



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

**ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE**

INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

**TECHNOLOGIE LEMOVÁNÍ PLECHŮ**

FLANGING TECHNOLOGY OF SHEET METALS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**

BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**

AUTHOR

**Kateřina Sobotková**

**VEDOUCÍ PRÁCE**

SUPERVISOR

**Ing. Eva Peterková, Ph.D.**

**BRNO 2017**

# Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav strojírenské technologie  
Studentka: **Kateřina Sobotková**  
Studijní program: Strojírenství  
Studijní obor: Základy strojního inženýrství  
Vedoucí práce: **Ing. Eva Peterková, Ph.D.**  
Akademický rok: 2016/17

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

## Technologie lemování plechů

### Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Jedná se o vytvoření obecného přehledu metod technologie lemování okraje plechu a otvorů

### Cíle bakalářské práce:

Provedení průzkumu v oblasti tváření a vytvoření přehledu používaných strojů a nástrojů pro lemování plechu. V práci by měl být uveden popis daných metod, používané nástroje a stroje, výhody a nevýhody uvedených metod a dle možností i příklady moderních výrobních postupů a vyráběných součástí. Vše bude doplněno názornou obrázkovou dokumentací.

### Seznam literatury:

TSCHÄTSCH, Heinz. Metal forming practise: processes - machines - tools. New York: Springer-Verlag, c2006. ISBN 35-403-3216-2.

Handbuch der Umformtechnik: processes - machines - tools. New York: Springer, c1996. ISBN 35-406-1099-5.

SUCHY, Ivana. Handbook of die design: processes - machines - tools. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c2006. ISBN 00-714-6271-6.

LIDMILA, Zdeněk. Teorie a technologie tváření: processes - machines - tools. Brno: Univerzita obrany, 2008. ISBN 978-80-7231-579-6.

NOVOTNÝ, Karel. Tvářecí nástroje. Brno: Vysoké učení technické, 1992. ISBN 80-214-0401-9.

SAMEK, Radko a Eva ŠMEHLÍKOVÁ. Speciální technologie tváření: Část I. 1. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2010. ISBN 978-80-214-4220-7.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2016/17

V Brně, dne

L. S.

---

prof. Ing. Miroslav Píška, CSc.  
ředitel ústavu

---

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.  
děkan fakulty

## **ABSTRAKT**

SOBOTKOVÁ Kateřina: Technologie lemování plechu

---

Na základě literární studie problematiky plošného tváření a internetového průzkumu je v práci přiblížena problematika ohybu, lemování plechů, lemování otvorů, stroje a nástroje pro lemování a speciální lemovací stroje a příslušenství. Součástí práce je názorná obrázková dokumentace.

Klíčová slova: lemování, ohýbání, lemováčka, rovinný lem, vydutý lem, vypuklý lem

## **ABSTRACT**

SOBOTKOVÁ Kateřina: The Flanging Technology of the Sheet Metals

---

The issue of bending technology, flanging technology, hole-flanging, machines and tools for constitutive bending and special flanging machines and equipment based on the literary studies and internet research is being introduced in this work. The illustrated documentation is attached to this work.

Keywords: flanging, bending, flanging machine, straight flange, stretch flange, shrink flange

## **BIBLIOGRAFICKÁ CITACE**

SOBOTKOVÁ, Kateřina. *Technologie lemování plechů*. Brno, 2017. 38s, CD. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství. Ústav strojírenské technologie, Odbor technologie tváření kovů a plastů. Vedoucí práce Ing. Eva Peterková, Ph.D.

## **ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Tímto prohlašuji, že předkládanou bakalářskou práci jsem vypracovala samostatně, s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího bakalářské práce.

V ..... dne 26.5.2017

.....  
Podpis

## **PODĚKOVÁNÍ**

Tímto děkuji paní Ing. Evě Peterkové Ph.D. za cenné připomínky a rady týkající se zpracování bakalářské práce. Dále bych chtěla poděkovat rodině a všem blízkým za trpělivost a podporu po celou dobu studia.

# OBSAH

Zadání

Abstrakt

Bibliografická citace

Čestné prohlášení

Poděkování

Obsah

Str.

<b>ÚVOD</b>	9
<b>1 TECHNOLOGIE LEMOVÁNÍ</b>	10
<b>1.1 Využití lemování</b>	10
<b>1.2 Teorie ohybu</b>	11
1.2.1 Charakteristiky ohybu	12
1.2.2 Odpružení ohybu	13
1.2.3 Minimální a maximální poloměr ohybu	14
1.2.4 Výpočet ohybací síly a práce	15
1.2.5 Nežádoucí účinky ohýbání	17
1.2.6 Technologické aplikace principu ohýbání	18
<b>2 ZPŮSOBY LEMOVÁNÍ</b>	20
<b>2.1 Metody lemování</b>	21
2.1.1 Lemování pevným nástrojem	21
2.1.2 Lemování nepevným nástrojem	22
2.1.3 Elektromagnetické lemování	23
<b>2.2 Druhy lemu</b>	23
2.2.1 Přímý lem	24
2.2.2 Vydutý lem	25
2.2.3 Vypuklý lem	26
2.2.4 Lemování otvorů	27
<b>2.3 Mezní tvařitelnost</b>	30
<b>3 STROJE A NÁSTROJE</b>	32
<b>3.1 Lemování na víceúčelových strojích</b>	32
<b>3.2 Výhradně lemovací stroje</b>	33
3.2.1 Ruční lemováčky	34
3.2.2 Motorizované lemováčky	35
3.2.3 Automatické lemováčky	35
3.2.4 CNC lemováčky	36
<b>4 ZÁVĚRY</b>	38

Seznam použitých zdrojů

Seznam použitých symbolů a zkratk

Seznam obrázků



## ÚVOD [4], [16], [17], [28]

V současné době je na trhu vysoká poptávka v oblasti rozmanitého zpracování plechů. Mezi nejčastěji používané technologie zpracování patří tváření.

Tváření umožňuje dosáhnout požadovaného tvaru výrobku bez porušení celistvosti materiálu. Polotovár je plasticky deformován působením vnějších tvářecích sil bez odběru třísky. Mezi výhody patří úspora materiálu oproti třískovému obrábění, vysoká produktivita práce a velmi dobrá rozměrová přesnost. Tváření se dělí podle teploty na tváření za studena a za tepla, dále na plošné a objemové tváření.

Lemování plechů je metoda plošného tváření za studena, která vychází z teorie ohýbání plechů. Využívá se především z hlediska bezpečnosti, vyztužení okrajů nebo pro dodatečné vytvoření spoje. Lemovací technologie je nejvíce využívána ve strojírenství, automobilovém či leteckém průmyslu. Dále také v potravinářství, zemědělství nebo stavebnictví. Ve stavebnictví se objevuje především v halových konstrukcích a klempířství, kde se využívají olemované plechy pro lemování zdí, komínů a střech.

K ohýbání a lemování jsou používány materiály, které mají dostatečnou tažnost pro ohybové namáhání, aby nedošlo k porušení tvářeného polotovaru. Ke zvýšení tažnosti a pevnosti lemovaného materiálu se využívá různých povrchových úprav. Na obr. 1 je uvedeno několik příkladů součástí opatřenými lemy.



Obr. 1 Příklady lemovaných součástí [16], [36]

## 1 TECHNOLOGIE LEMOVÁNÍ [5], [7], [11], [12], [15], [17], [28], [32], [36]

Plechů různých rozměrů je možné mnoha způsoby ohnout do libovolného tvaru s cílem dosažení požadované geometrie dílce. Jedním z nejdůležitějších hledisek při výrobě plechových součástí je stav okraje plechu. Lemovací operace jsou běžně používány při průmyslovém tváření plechových dílů. V podstatě se jedná o zahnutí okraje plechu, který je vzhledem k velikosti polotovaru považován za malý.

Technologie lemování vychází z teorie ohýbání. Dochází k ohýbání okraje rovinné nebo prostorové plochy se záměrem zaoblení ostrých hran, vyztužení okrajů či dosažení dekorativního vzhledu. Slouží rovněž ke zhotovení žlábků uprostřed nebo na okraji výlisků pro zlepšení tuhosti.

Lemováním po obvodu dílců je možné zvýšit jejich tuhost a vytvořit plochu potřebnou pro spojování součástí nýtováním nebo bodovým svařováním. Pro šroubová spojení se využívají lemy opatřené závitem.

### 1.1 Využití lemování [7], [17], [28], [36]

Typickým využitím pro lemování jsou letecké a automobilové konstrukce. Výhodou je úbytek hmotnosti při zachování pevnostních a „tuhostních“ vlastností. Lemy otvorů usnadňují instalaci montážních spojů, elektrosystémů a hydrosystémů. Lemy se nacházejí i ve většině domácností, názorným příkladem jsou kuchyňské hrnce, poklice či plechy na pečení.



Obr. 2 Praktické využití lemování [36]

## 1.2 Teorie ohybu [5], [7], [11], [12], [15], [17], [36]

Vzhledem k tomu, že lemování vychází z teorie ohybu, bude tato kapitola zaměřena na problematiku ohybu.

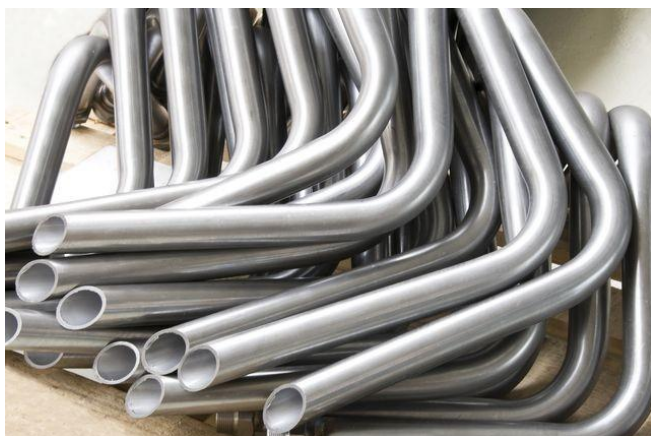
Ohýbání je technologická operace, u které dochází k nevratnému porušení materiálu důsledkem využití ohybového momentu od ohýbací síly. Na obr. 3 je uveden dílec vyrobený za pomoci této technologie. Materiál je možné vzniklým napětím ohýbat nebo rovnat. Ohýbáním je možné dosáhnout požadované přeměny tvaru, aniž by došlo k podstatné změně průřezu.



Obr. 3 Dílec zpracovaný ohýbáním [36]

Ohýbání se nejčastěji provádí za studena. Za tepla se používá u tvrdých a křehkých materiálů (ocelové plechy s tloušťkou větší než 40 mm). Dále je možné rozlišit ohýbání širokých a úzkých polotovárů. Za úzké polotovary se považují dílce se šířkou menší než trojnásobek tloušťky, široké polotovary mají šířku větší než trojnásobek tloušťky. Při ohybu dochází k větší deformaci příčného průřezu u širokých profilů.

V současné době se ohýbáním tváří velké množství polotovárů jako například pásy, trubky, profily, plechy atd., ukázky jsou uvedeny na obr. 4. Škála ohýbacích strojů je velice různorodá, používají se podle tvaru a způsobu ohybu s ohledem na rozměry a množství ohýbaných součástí.

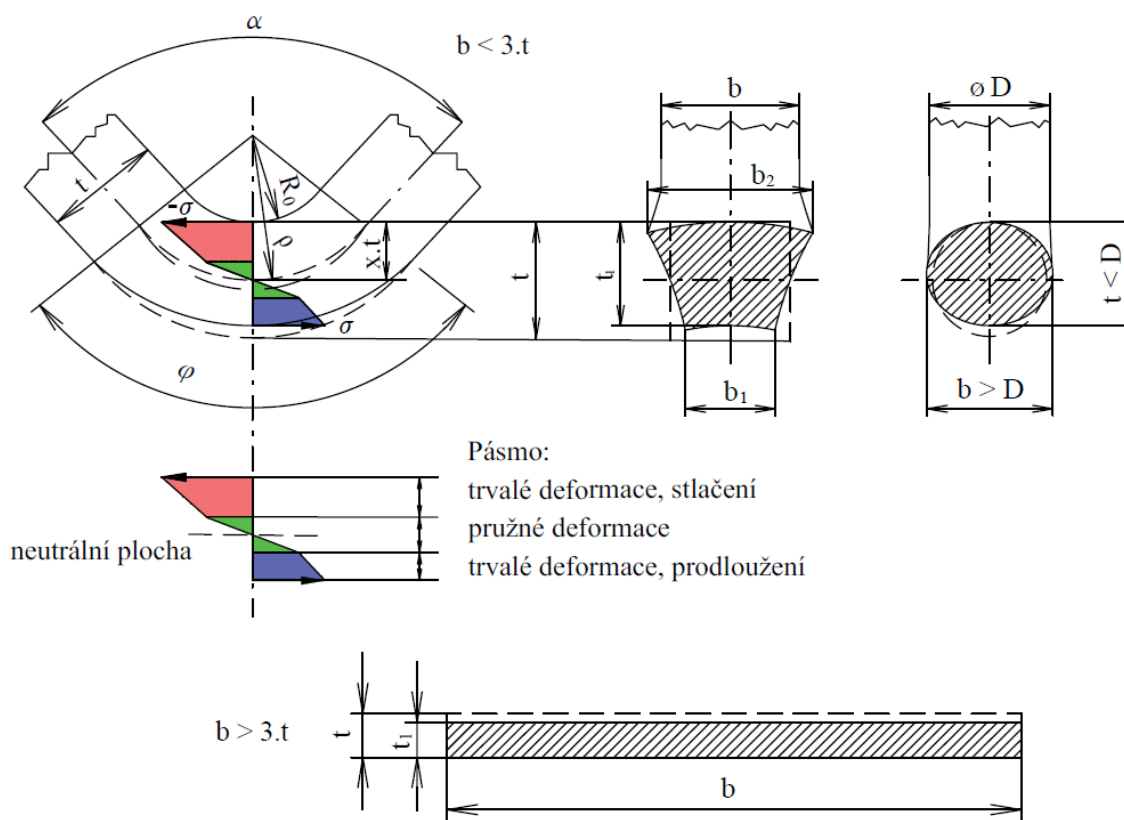


Obr. 4 Zohýbané polotovary [36]

### 1.2.1 Charakteristiky ohybu [5], [12], [15]

Základní charakteristikou ohybu je přeměna tvaru neutrální plochy ohýbané součásti. Neutrální plocha se nachází v místě, kde hodnota deformací a napětí nabývá nulovou hodnotu. V tomto místě také ohybové napětí a deformace mění svůj smysl z tahového na tlakový. Jako důsledek této změny dochází při ohýbání ke změně průřezu polotovaru, jak je schematicky znázorněno na obr. 5. Pomocí neutrální plochy je možné stanovit konečnou délku polotovaru. Vlivem působení napětí, a se zmenšujícím se poloměrem ohybu se neutrální plocha posouvá směrem k vnitřnímu poloměru ohybu.

Na obr. 5 je dále zobrazen průběh napětí rozložený na příčném průřezu ohýbaného materiálu. Z počátku se ohybové napětí pohybuje pod mezí kluzu  $R_e$  a dochází ke vzniku elastické deformace. Ve chvíli, kdy ohybové napětí překročí mez kluzu  $R_e$ , vzniká plastická deformace, a tím je možno dosáhnout trvalého ohybu. Napětí nesmí překročit mez pevnosti  $R_m$ , protože by mohl nastat mezní stav lomu a dojít k porušení celistvosti tvářeného materiálu.



Obr. 5 Průběh napětí a deformace průřezu  $b \times t$  a  $\phi D$  [12]

Teorie ohybu velkých polotovarů, kde  $R_0 \geq 12 \cdot t$  vychází z předpokladu, že se neutrální plocha nachází uprostřed tloušťky materiálu. Polohu neutrální osy je možné stanovit ze vztahu:

$$\rho = R_0 + \frac{1}{2} t \quad (1.1)$$

$R_0$  ... poloměr ohybu [mm]  
 $t$  ... tloušťka materiálu [mm]



Polohu neutrální plochy pro menší poloměry ohybu, kde  $R_0 < 12 \cdot t$  lze stanovit ze vztahu:

$$\rho = R_0 + x \cdot t \quad (1.2)$$

$R_0$	...	poloměr ohybu [mm]
$t$	...	tloušťka materiálu [mm]
$x$	...	součinitel posunutí neutrální plochy, velikost je závislá na tloušťce polotovaru a poloměru ohybu [-]

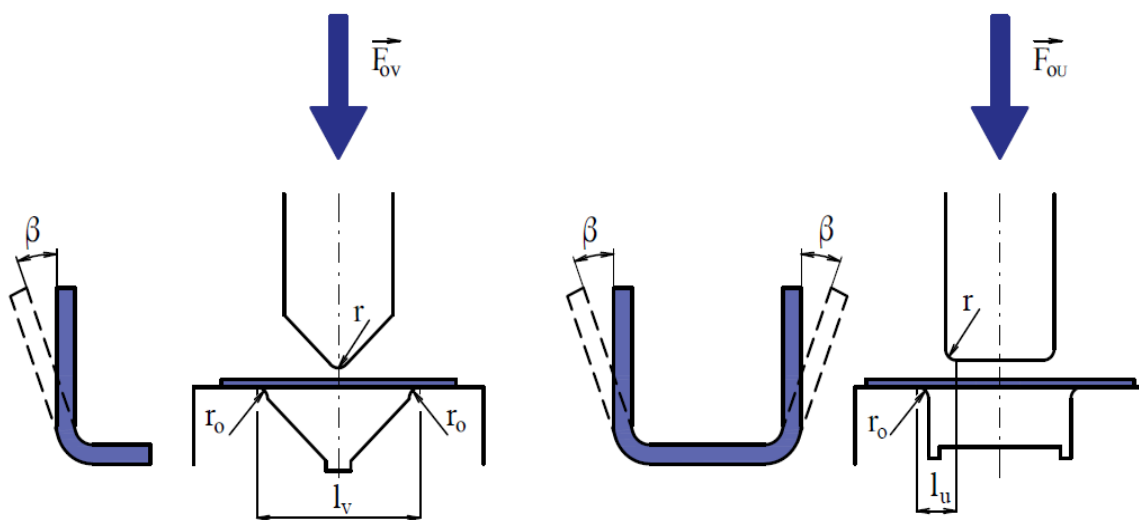
Důležitou charakteristikou ohýbané součásti je délka jejího polotovaru, která je rovna součtu všech délek rovných úseků výchozí součásti a délek neutrální plochy v místě ohybu. Délka neutrální plochy ohnuté části dílce se stanoví dle vztahu:

$$l_n = \frac{\pi \cdot \varphi}{180} \cdot (R_0 + x \cdot t) \quad (1.3)$$

$R_0$	...	poloměr ohybu [mm]
$t$	...	tloušťka materiálu [mm]
$\varphi$	...	úhel ohnutého úseku [°]
$x$	...	součinitel posunutí neutrální plochy [-]

### 1.2.2 Odpružení ohybu [5], [7], [12]

Odpružení je negativní jev, který má za následek změnu rozměru a tvaru dílce. Z průběhu napětí v místě ohybu vyplývá, že ne v celém průřezu napětí překročí mez kluzu a materiál má snahu se vrátit o určitý úhel zpět. Úhel, o který se materiál vrátí, se nazývá úhel odpružení  $\beta$ . Velikost odpružení závisí na pružných vlastnostech materiálu, na tloušťce materiálu, velikosti úhlu ohybu, způsobu ohybu, poměru poloměru ohybu k tloušťce plechu a konstrukci ohýbacího nástroje. Materiál se přehýbá o velikost úhlu odpružení, aby bylo dosaženo požadovaného úhlu ohybu po odtižení ohybové síly. Na obr. 6 jsou zobrazeny dva základní typy ohýbání a k nim příslušné rameno ohybu a úhel odpružení.



Obr. 6 Úhel odpružení a rameno ohybu při ohýbání do tvaru U a V [5]

V praxi je možné určit velikost odpružení pomocí diagramů sestavených z praktických zkoušek (obr. 7) nebo přibližným výpočtem ze vztahů:

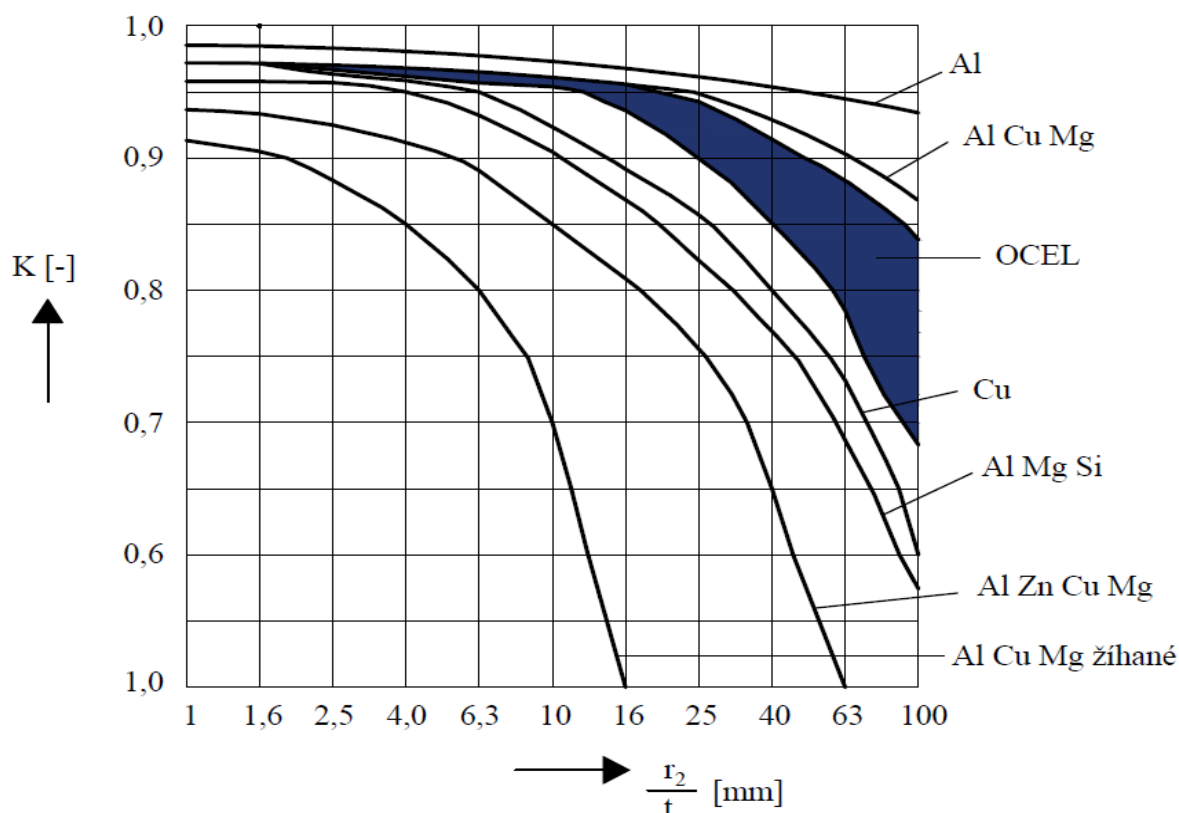
- pro ohýbání do tvaru V

$$\beta = \arctg 0,0375 \frac{l_V \cdot Re}{x \cdot t \cdot E} \quad (1.4)$$

- pro ohýbání do tvaru U

$$\beta = \arctg 0,075 \frac{l_U \cdot Re}{x \cdot t \cdot E} \quad (1.5)$$

$\beta$	...	úhel odpružení [°]
$l_V, l_U$	...	rameno ohybu [mm]
$x$	...	součinitel posunutí neutrální plochy [-]
$Re$	...	mez kluzu ohýbaného materiálu [MPa]
$E$	...	modul pružnosti v tahu [MPa]



Obr. 7 Diagram pro určení úhlu odpružení různých materiálů [5]

### 1.2.3 Minimální a maximální poloměr ohybu [7], [11], [12], [17]

Minimální poloměr ohybu  $R_{\min}$  je nejmenší poloměr ohybu, u kterého by na vnější straně ohybu nemělo dojít k znehodnocení a porušení krajních vláken materiálu. Jeho velikost je ovlivněna způsobem ohýbání, úhlem ohybu, plastičností materiálu, šířce a tloušťce plechu a kvalitou povrchu. U méně tvářitelných materiálů mohou při ohybu vznikat trhliny.

Početně lze  $R_{\min}$  stanovit ze vztahu:

$$R_{\min} = \frac{t}{2} \cdot \left( \frac{1}{\varepsilon_c} - 1 \right) = c \cdot t \quad (1.6)$$

$\varepsilon_c$  ... mezní prodloužení - stav, kdy napětí přesáhne mez pevnosti v tahu a dojde k porušení materiálu ohýbaného polotovaru [mm]

$t$  ... tloušťka materiálu [mm]

$c$  ... koeficient prodloužení [-]:

měkká ocel	0,5 - 0,6
měkká mosaz	0,3 - 0,4
hliník	0,35
dural	3 - 6
měkká měď	0,25

Uvedené hodnoty jsou orientační a platí pro příčný či podélný směr vláken a pro ideální povrch bez mikrotrhlin a rýh.

Maximální poloměr ohybu  $R_{\max}$  je poloměr ohybu, po jehož překročení dojde k trvalé deformaci v krajních vláknech materiálu. Lze ho získat ze vztahu:

$$R_{\max} = \frac{t}{2} \cdot \left( \frac{E}{R_e} - 1 \right) \quad (1.7)$$

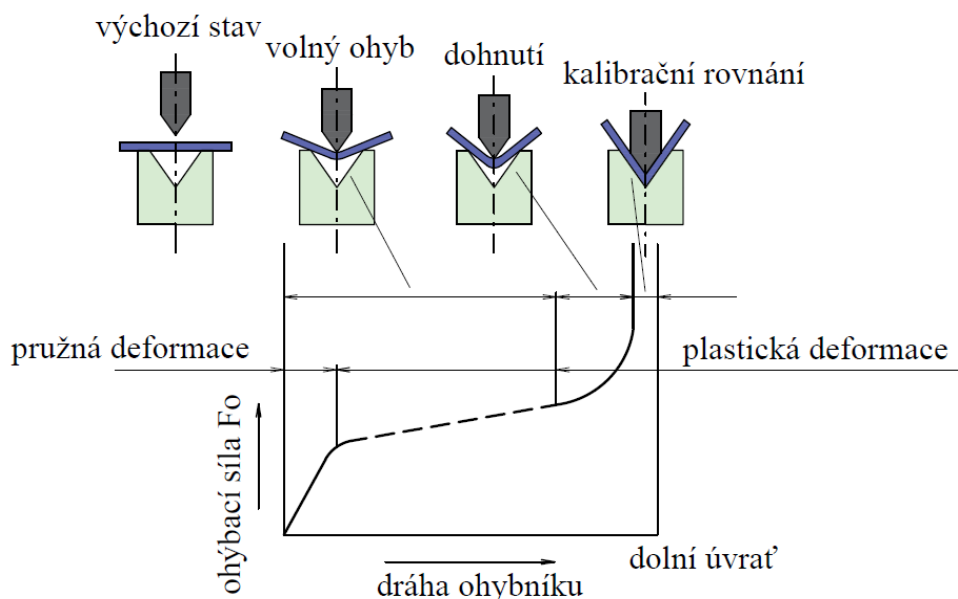
$R_e$  ... mez kluzu ohýbaného materiálu [MPa]

$E$  ... modul pružnosti v tahu [MPa]

$t$  ... tloušťka materiálu [mm]

#### 1.2.4 Výpočet ohýbací síly a práce [5], [7], [12], [36]

Průběh ohýbací síly během procesu tváření (obr. 8) je složitý a její matematická formulace není jednoduchá, obzvláště, když při výpočtu je nutné zohlednit vlivy všech faktorů, které v daném procesu působí jako například geometrie dílce a nástroje, materiálové vlastnosti, typ ohybu, tření apod.



Obr. 8 Průběh ohýbací síly v závislosti na dráze ohybníku [12]

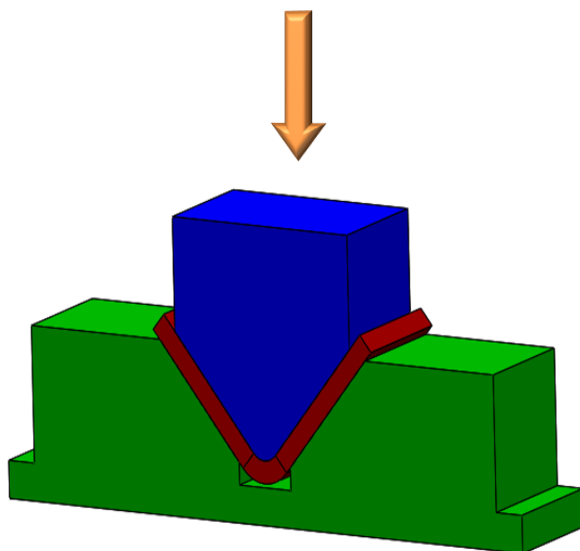
Při ohýbání v ohýbadlech na lisech nebo při ohýbání na ohraňovacích lisech je možné výpočty vztahovat ke dvěma základním typům ohýbání. Složité tvary ohýbaných součástek lze rozdělit na ohyb do tvaru „V“ a ohyb do tvaru „U“. Při výpočtu ohýbací síly se vychází z rovnosti ohybových momentů od vnitřních a vnějších sil.

● Ohýbání do tvaru V - ohýbaný polotovaru se bere jako nosník umístěný na dvou podporách a zatížený silou umístěnou uprostřed, to je patrné z obr. 9. Ohybový moment vyvolaný vnitřními silami souvisí s napětím potřebným pro ohnutí polotovaru a průřezovými charakteristikami.

$$\text{síla:} \quad F_{0V} = \frac{b \cdot t^2 \cdot R_e}{2 \cdot \rho} \cdot \operatorname{tg} \frac{\alpha}{2} \quad (1.8)$$

$$\text{práce:} \quad A_{0V} = \frac{F_{0V} \cdot L}{1000} \cdot \frac{1}{3} \quad (1.9)$$

$F_{0V}$	...	ohybová síla při ohýbání do tvaru V [N]
$A_{0V}$	...	práce při ohýbání do tvaru V [J]
$\alpha$	...	úhel ohybu [°]
$R_e$	...	mez kluzu ohýbaného materiálu [MPa]
$\rho$	...	poloměr zaoblení neutrální plochy [mm]
$L$	...	vzdálenost mezi podporami [mm]
$b$	...	šířka polotovaru [mm]



Obr. 9 Princip a přípravek pro ohyb do tvaru V [36]

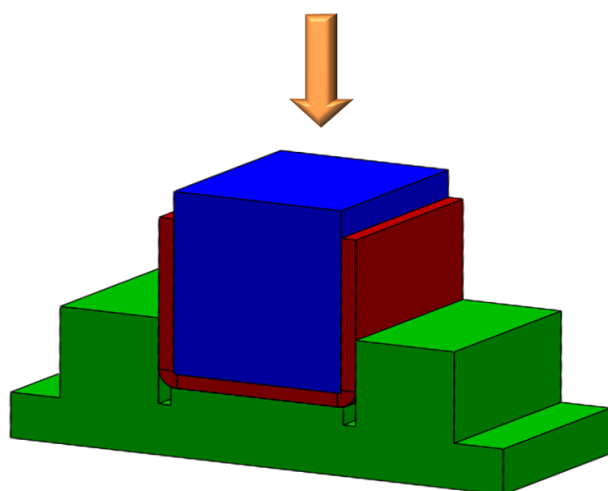
● Ohýbání do tvaru U - stejně jako v předchozím případě je polotovaru považován za nosník na dvou podporách zatížený silou uprostřed. Liší se ramenem ohybu, které je závislé na délce čela ohybníku a průběhem ohýbací síly. Princip a jednoduchý ohýbací nástroj je uveden na obr. 10.

$$\text{síla:} \quad F_{0U} = (1 + 7\mu) \cdot \frac{b \cdot t^2 \cdot R_e}{\rho + t} \quad (1.10)$$



práce: 
$$A_{0U} = \frac{F_{0U} \cdot Z}{1000} \cdot \frac{2}{3} \quad (1.11)$$

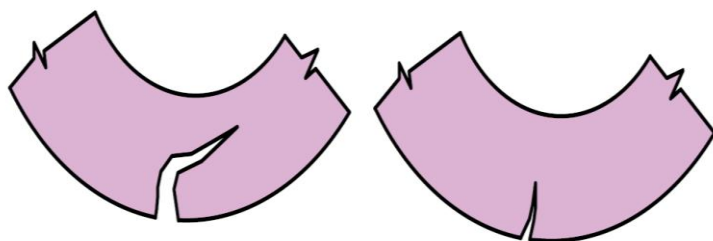
$F_{0U}$	...	ohybová síla při ohýbání do tvaru U [N]
$A_{0U}$	...	práce při ohýbání do tvaru U [J]
$R_e$	...	mez kluzu ohýbaného materiálu [MPa]
$\rho$	...	poloměr zaoblání neutrální plochy [mm]
$b$	...	šířka polotovaru [mm]
$t$	...	tloušťka materiálu [mm]
$\mu$	...	součinitel tření [-]
$Z$	...	potřebný zdvih [mm]



Obr. 10 Princip a přípravek pro ohyb do tvaru U [36]

### 1.2.5 Nežádoucí účinky ohýbání [5], [7], [12], [17]

Získání přesného tvaru konečné součásti ovlivňuje mnoho různých faktorů, mezi nimi i technologické problémy jako např. praskání materiálu či tvorba vln. Trhlínky vznikají při porušení soudržnosti materiálu vlivem jeho zpevňování (obr. 11). Při stejné tloušťce materiálu začne žíhaný polotovár praskat, až při menším poloměru ohybu než součást v nevyžíhaném stavu. Vlny se objevují při tváření dílců s tenkými stěnami. Lze jim předejít využitím tahové síly při ohybu nebo za pomoci bočního přitlačení materiálu k nástroji.



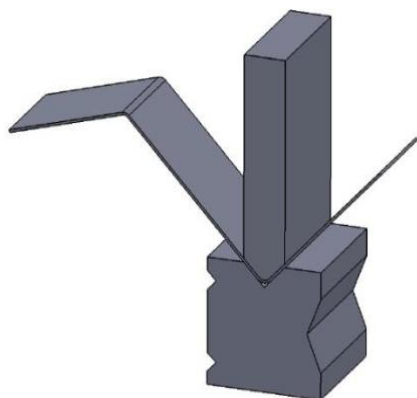
Obr. 11 Porušení materiálu při ohýbání [12]

### 1.2.6 Technologické aplikace principu ohýbání [7], [12], [17], [36]

Podle uplatnění technologického způsobu výroby a použití výrobních strojů se ohýbání dělí na několik skupin.

- Klasické ohýbání - požadovaný tvar součásti se získá pomocí V a U ohybu. Využívá se u dílců menších rozměrů s ostrými poloměry ohybu. Zahrnuje ruční či strojní ohýbání na strojích, tzv. ohýbačkách, slouží k ohýbání dlouhých pruhů a plechů. Nástrojem jsou jednoduchá, postupová a sdružená ohýbadla.

- Ohraňování - technologie ohraňování je strojní aplikace základního V a U ohybu na ohraňovacích lisech. Využívá se pro technologicky složitější ohyby, umožňuje tváření velmi dlouhých polotovárů a výrobu tzv. krabicových součástí. Nástroje jsou jednodušší a mají univerzální použití. Na obr. 12 je schéma a ukázka CNC ohraňování s vybočeným razníkem.



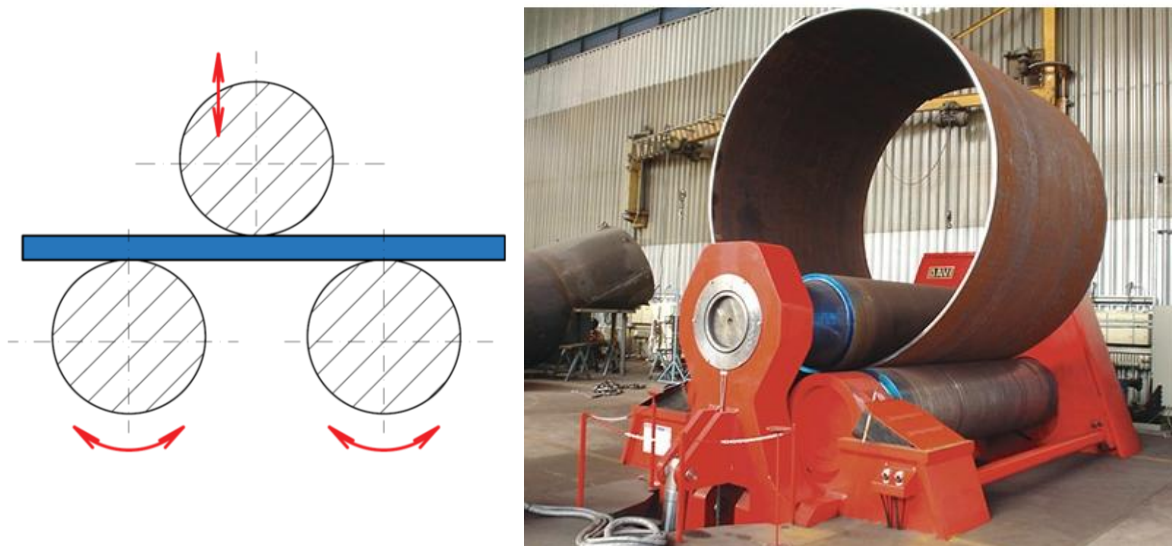
Obr. 12 Ohraňování [36]

- Rovnání - odstraňuje nežádoucí deformace způsobené volbou technologie výroby polotovaru nebo manipulací s materiálem. Rovnat je možné za pomoci rovnaček (obr. 13), které obsahují vstupní a výstupní pár zaváděcích válců a dvě či více sad rovnajících válců. Na začátku je součást ohýbána v obou směrech a postupným zvětšením vzdálenosti mezi válci se vyrovnává a na výstupní straně vychází rovná.



Obr. 13 Rovnačky [36]

● Zakružování - postupným a plynulým ohýbáním mezi válci se tvarují kuželové nebo válcové plochy. Stroje se nazývají zakružovačky a dělí se na ruční a strojní, nebo podle počtu válců na dvou, tří a čtyřválcové. Tenké plechy do tloušťky  $t \leq 40$  mm se tváří za studena a plechy větších tloušťek se zakružují za tepla. Obr. 14 zobrazuje princip a ukázkou zakružování na hydraulické tříválcové zakružovačce.



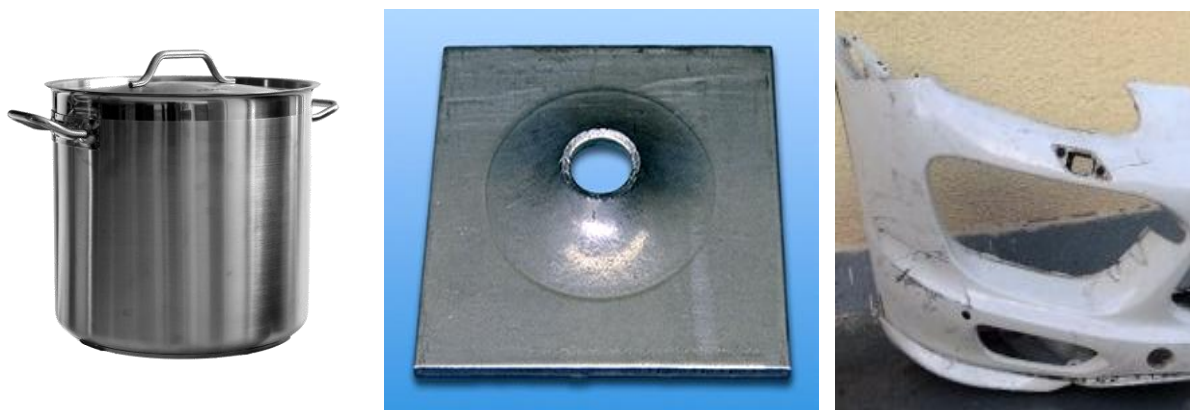
Obr. 14 Zakružování [12], [36]

## 2 ZPŮSOBY LEMOVÁNÍ [4], [9], [18], [19], [20], [21], [22], [24], [28], [29], [31], [32], [33], [34], [35], [36], [37], [38], [39]

Lemování plechů náleží k rychlému a nákladově efektivnímu typu zpracování plechových polotovarů a v praxi je hojně využíván. Způsob lemování je jednou z technologické aplikace principu ohýbání. Této problematice je věnována předcházející kapitola. V principu jde o ohyb přesahující okraje polotovaru určité délky přes hranu matrice (ohybnice) s cílem vytvořit požadovaný úhel ohybu. Nejčastěji se jedná o ohyb o  $90^\circ$  nebo  $180^\circ$ . Při zhotovování lemu na polotovar působí kombinace tahového a tlakového namáhání.

Lem lze získat i u speciálně předpřipravených polotovarů, jako jsou např. dílce s vystřiženým otvorem nebo jinou rovinnou či prostorovou křivkou. Zpravidla bývá dělen na vnější a vnitřní, dále pak na uzavřený či otevřený.

- Uzavřené lemy (obr. 15) - jedná se o obvodové lemování okraje dílce z plechů či lemování kruhových případně nekruhových otvorů zhotovených na součásti nebo polotovaru technologiemi vrtání nebo děrování. Lem je realizován po uzavřené křivce. Tyto lemy jsou používány například pro vytvoření spojů okapových rour a otvorů pro světla v automobilech.



Obr. 15 Uzavřený lem [36]

- Otevřené lemy - týká se přímých, vypuklých nebo vyduťtých stěn u plechových dílců. Lemování je prováděno po neuzavřené křivce. Slouží také k uchycení jednoho dílu do druhého. Využívají se především v klempířství pro spojování plechových pásů, v automobilovém průmyslu při výrobě blatníků, nárazníků či vnějšího oplechování dveří automobilu. Reálné dílce jsou zobrazeny na obr. 16.



Obr. 16 Otevřený lem [36]



Při výrobě je třeba dbát na určitou standardizaci nástrojů a podmínek procesu. Při jejich nedodržení může dojít k porušení celistvosti materiálů a vzniku defektů, jako jsou trhliny, odpružení, zvlnění, nedostatečná výška lemu či velké ztenčení stěny. Některé z uvedených defektů jsou znázorněny na obr. 17. Nejsledovanějšími výrobními parametry jsou geometrie nástrojů (lisovník a matrice) a síly od horních i spodních přidržovačů.



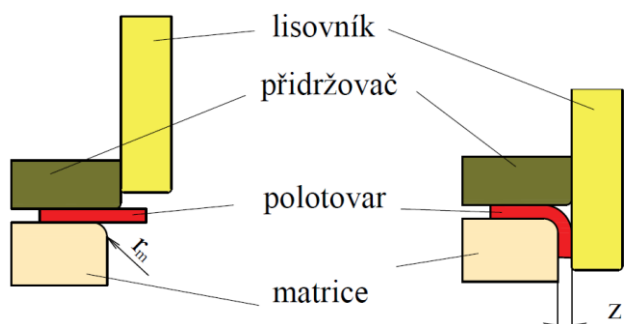
Obr. 17 Defekty lemu [36]

## 2.1 Metody lemování [19], [20], [22], [24], [28], [32], [35], [37]

Metody používané pro vytvoření lemu vycházejí z metod ohýbání. Lze je rozdělit do tří základních skupin. V první skupině je materiál deformován silou působící na pevný materiál, nejčastěji kalenou či vytvrzenou ocel. U nepevného nástroje působí síla na elastomer uložený v pouzdře, elastický nástroj je šetrnější k namáhanému povrchu výlisku. Třetí metoda je poměrně nová a využívá magnetického tlaku vytvořeného pomocí cívky a elektrického proudu. Vzniká prostorová napjatost a výhodou je menší riziko vzniku defektů.

### 2.1.1 Lemování pevným nástrojem [28], [35], [37]

Pevným nástrojem se rozumí konvenční nástroj, jehož všechny funkční části jsou vyrobeny z kovového materiálu. Princip lemování daným nástrojem je schematicky znázorněn na obr. 18. Polotovar se s přesahem o velikosti rozvinuté výšky lemu uloží na lisovnici se zaoblenou hranou. Lisovník se začne pohybovat k dolní úvratí. Nejdříve na ohýbaný materiál dosedá přidržovač, jehož úkolem je udržet rovinu plechu. Nejčastěji bývá spojen přímo s beranem plynovými pružinami. Pokračujícím pohybem beranu směrem dolu vytvoří lisovník lem.



Obr. 18 Schéma lemování pevným nástrojem [28]

Důležitým parametrem procesu je poloměr zaoblení matrice  $r_m$ , síla přidržovače, velikost mezery „ $z$ “ mezi lisovnicí a lisovníkem a tvar čela lisovníku. Tyto účinky ovlivňují výsledný tvar lemu. Přítlačná síla působící od přidržovače a poloměr zaoblení lisovnice ovlivní vtahování dalšího materiálu a konečnou výšku lemu.

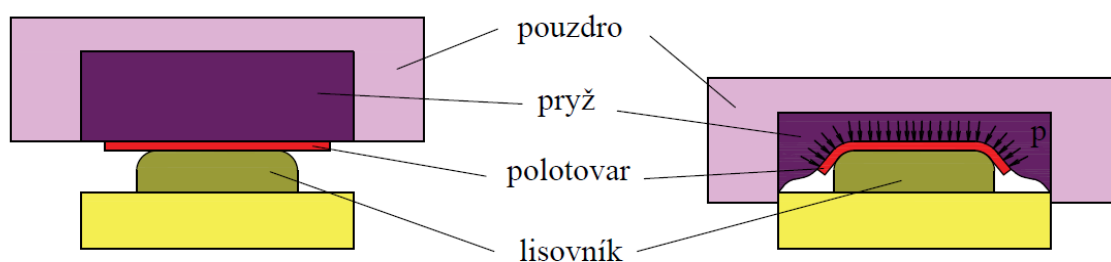
Tímto způsobem se velmi často zhotovují vyduuté lemy vnějšího obvodu dílců s malým poloměrem konvexní křivky. Pevný nástroj se také přednostně používá pro lemování otvorů. Malá mezera „ $z$ “ předchází případnému zvlnění lemu. Nástroje jsou méně namáhány a mají delší trvanlivost. Je požadováno menších tvářecích sil a tím i menší

množství přetvárné energie. Na druhou stranu je zapotřebí přesnějších nástrojů a s tím jsou spojeny vyšší výrobní náklady.

Pevných nástrojů je využíváno při tváření za tepla i za studena. Pro materiály lemované za studena je výhodou vysoká přesnost rozměrů a nevýhodou omezená tvárnost materiálu. U dílců lemovaných za tepla vznikají malé přetvárné odpory naopak nedostatkem je menší rozměrová a tvarová přesnost, možnost vzniku okujení a díky vysoké spotřebě energie a větším investičním nákladům se pro lemování používá výjimečně.

### 2.1.2 Lemování nepevným nástrojem [22], [28], [32], [35]

Tváření nepevným nástrojem je založeno na použití dvou činných částí nástroje, z nichž jedna je elastická a během procesu mění svůj tvar. V případě lemování je elastickou částí lisovnice, která je vyrobena z elastomeru uloženého v pouzdře. Jako elastická média jsou používány pryž a polyuretan. Pomocí silového působení beranu lisu je lisovnice přitlačována na polotovar. Narůstajícím tlakem se elastomer vychyluje a umožňuje materiálu vytvoření lemu kolem lisovníku. Nepevný nástroj ohne materiál kolem lisovníku a vytvoří poloměr ohybu, který bude velmi podobný skutečnému zaoblení lisovníku. Lem je zhotoven najednou. Princip je uveden na obr. 19. K této metodě jsou nejčastěji využívány hydraulické lisy, protože působí pozvolná síla a plech je lépe tvarován.



Obr. 19 Lemování nepevným nástrojem [28]

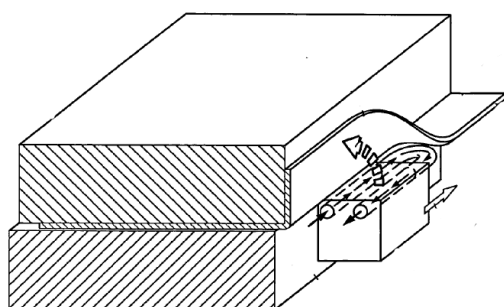
Tento způsob výroby přináší řadu výhod, jako je levný a jednoduchý nástroj, jeho snadná výměna a univerzální použití (jedno lemovací pouzdro lze využít pro více strojů). Lze ho využít k lemování lakovaných, leštěných či jinak povrchově upravovaných plechů. Použitím mnohem měkčích materiálů nedochází k poškození dílců od matrice, tím je zaručena daleko větší kvalita povrchu tvářeného plechu než při použití pevných nástrojů. Lisovník je vyráběn z levnějších materiálů, jako jsou plasty, lehké kovy, vrstvené materiály a dřevo, tyto materiály jsou též šetrnější k povrchu výrobku. Nedochází také ke ztenčení plechů. Zásadou několikrát nižších nákladů na výrobu lisovnice se dá používat pro různé tvary a rozměrnější dílce. Další výhodou je možnost kombinace s jinými technologiemi, jako je stříhání a mělké tažení. Metoda se také vyznačuje nižšími nároky na přesnost výrobních strojů a lze využít i starších strojů.

Nevýhodou je následný vznik velkého odpružení a méně kvalitnější geometrie lemu. Nástroj má nízkou trvanlivost a dochází k rychlému opotřebení. Metoda je vhodná pouze pro tenkostěnné plechy, neboť je zde potřeba velké síly na přetvoření elastomeru. Dále je zde nutné důkladné ustavení polotovaru na lisovníku, aby se zabránilo ohybu v jiném místě plechu, což omezuje velkosériovou výrobu.

Z těchto důvodů se lemování nepevným nástrojem používá pro malosériovou, spíše kusovou výrobu. Metoda je vhodná zejména při výrobě součástek v leteckém průmyslu, klempířství či ochranných oplechování strojů a zařízení.

### 2.1.3 Elektromagnetické lemování (EMF) [19], [20], [24]

Jedná se o bezkontaktní vysokorychlostní proces tváření, což nese výhodu menšího poškození povrchu nástroje, čímž se snižují náklady na výrobu a zkrácení strojního času. Elektromagnetické tváření je založeno na konstrukci kombinace kondenzátoru, cívky, proudu a magnetického tlaku, který tváří daný materiál. Na začátku je kondenzátor silným elektrickým nábojem nabit na vysoké napětí, které vygeneruje přechodné magnetické pole obklopující cívku a elektricky vodivý plech. Vířivé proudy v přechodném magnetickém poli budí opačný směr indukovaného proudu ve výlisku oproti technologickému proudu.



Obr. 20 Princip EMF [20]

Vzájemným působením těchto dvou proudů vzniká tzv. Lorenzova síla, která výlisek deformuje. Na rozložení této síly v průběhu operace má také vliv počáteční geometrie výlisku. Pracovní elektrické a magnetické části jsou umístěné v pevném válci popř. hranolu, který postupně projíždí nad tvářeným polotovarem. K dosažení kompletního lemu je zapotřebí dvou až tří průjezdů tohoto válce. Princip výroby je uveden na obr. 20.

Tato metoda kombinuje technologii tváření, elektromagnetické síly a lemování pomocí válců. Lemování tímto způsobem uplatňuje velice velké proudové impulsy speciálně navržené elektrické cívky. Tímto způsobem se lemuji výlisky z vysoce elektricky vodivých materiálů, jako jsou hliníkové slitiny nebo oceli.

Výhodou, ve srovnání s konvenčním lemováním, je menší náchylnost ke tvorbě defektů. U tradičních metod dochází k rovinné napjatosti ve směru ohybu, která nejčastěji způsobuje popraskání, zejména pak u lisovaných plechů. U EFM vzniká prostorová napjatost, která praskání zabraňuje. Na obr. 21 je dílec vyrobený pomocí elektromagnetického lemování.



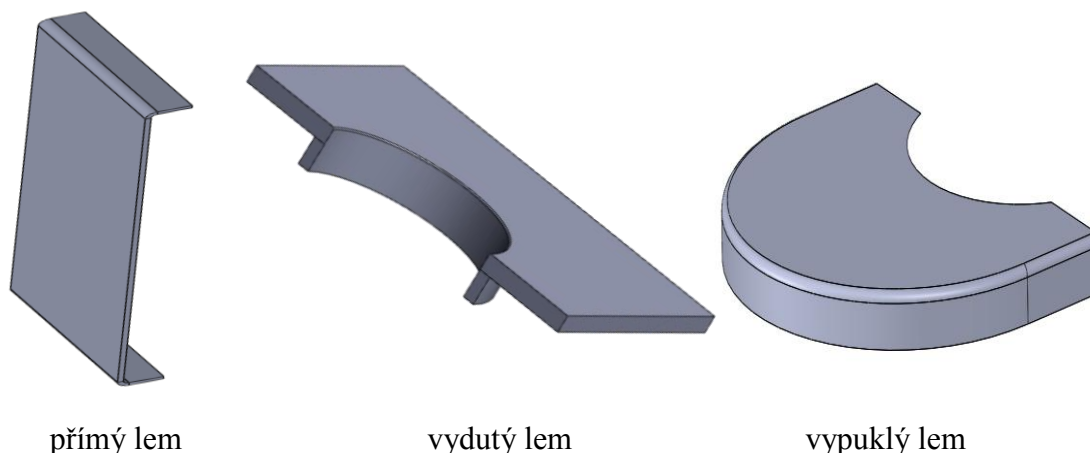
Obr. 21 Kryt mobilního telefonu vyrobený elektromagnetickým lemováním [19]

## 2.2 Druhy lemů [4], [9], [18], [21], [28], [31], [32], [33], [37], [38], [39]

Většinu plechových dílců je nutné především, z hlediska bezpečnosti, opatřit lemem. Obvykle jsou konstruovány kolem okrajů plechových dílů, po obvodu tzv. tvořící křivky.

Podle tvaru této křivky jsou rozeznávány tři základní typy: přímý, vyduťtý a vypuklý lem (obr. 22).

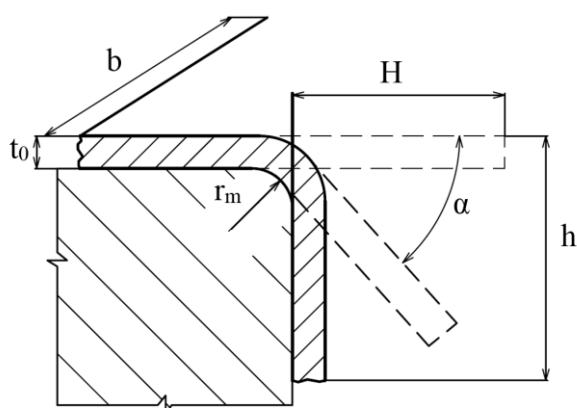
Také zde dochází ke vzniku velkého množství nedostatků, u přímého lemu se jedná o stejné defekty jako při ohýbání, tyto defekty jsou popsány v předchozí kapitole. U vyduťtého a vypuklého lemu se navíc objevuje nebezpečí trhlinek a vrásnění způsobené přebytkem napětí v tlaku či tahu ve stěně lemu. Těmto vadám lze předejít například změnou výšky lemu či geometrie nástroje. V případě výroby vypuklého lemu nepevným nástrojem pak i zvýšením měrného tlaku od elastického nástroje.



Obr. 22 Typy lemů [28]

### 2.2.1 Přímý lem [21], [28], [36], [37], [39]

U přímého nebo též rovinného lemu dochází k jednoosé deformaci. Tvářecí operace je jednoduchá a dá se klasifikovat jako ohýbání podél přímky. Namáhání v obvodovém směru je nulové. Přímý lem je ovlivněn zejména



Obr. 23 Geometrie přímého lemu [39]

tloušťkou plechu a poloměrem ohybu. Na obr. 23 jsou uvedeny geometrické parametry přímého lemu. V praxi jsou k výrobě nejčastěji používány ohýbačky a to jak ruční, tak i strojní. Dílce s přímými lemy jsou na obr. 24. U nepevného nástroje je vnější ohýbací síla dána součinem tlaku, délky lemu a délky volného konce. Délka volné části lemu se s rostoucím úhlem ohybu zkracuje. Pokud je její hodnota na konci tvářecí operace velmi malá, pak může být

ohybový moment od ohýbací síly nedostačující a dochází k nedolísování lemu.

Měrný tlak potřebný k vytvoření daného lemu je odvozen z momentové rovnováhy vnějších a vnitřních sil, pro kterou platí vztah:

$$q \cdot \frac{a^2}{2} \cdot b = \frac{1}{4} \cdot b \cdot t^2 \cdot Re + \frac{D}{r_m \cdot \frac{t}{2}} \cdot J \quad (2.1)$$

t ... tloušťka plechu [mm]  
Re ... mez kluzu [MPa]



b	...	šířka polotovaru [mm]
a	...	délka volného konce [mm]
q	...	měrný tlak elastomeru [Mpa]
$r_m$	...	poloměr zaoblení lisovníku [mm]
J	...	moment setrvačnosti daného průřezu [ $\text{kg} \cdot \text{m}^2$ ]

Rozvinutou výšku lemu lze určit ze vztahu:

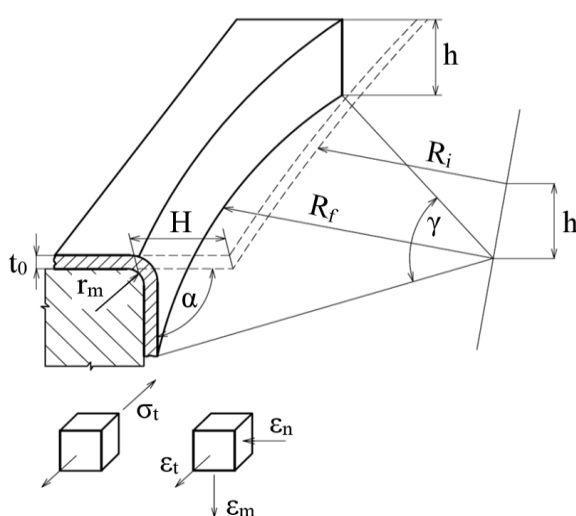
$$h = H + 0,46 \cdot r_m + 0,125 \cdot t \quad (2.2)$$

H	...	velikost přesahujícího okraje [mm]
$r_m$	...	poloměr zaoblení lisovníku [mm]
t	...	tloušťka plechu [mm]



Obr. 24 Příklady přímého lemu [36]

### 2.2.2 Vyduťtý lem [4], [18], [21], [12], [36], [37], [39]



Obr. 25 Geometrie vyduťtého lemu [39]

Obvodové zakřivení je zhotoveno pomocí vnitřního vybrání. Vzniká tahové napětí podél hrany lemu. Důsledkem toho se tloušťka plechu postupně zmenšuje a v případě, že poměrné přetvoření tloušťky materiálu překročí kritickou hodnotu, dochází ke vzniku trhlin v oblasti u hrany lemu. Ovlivňujícími parametry lemování dutého lemu je tloušťka plechu, poměrné přetvoření, poloměr vybrání a materiál. Měrný tlak má vliv pouze na dolisování nikoliv na vznik trhlin. Pokud se hodnota tečného přetvoření blíží ke kritickým hodnotám, je nutné operaci provést na dvakrát a materiál tepelně upravit. Schéma vyduťtého lemu je na obr. 25.

Za předpokladu použití anizotropního materiálu a zanedbání vzájemného tření mezi polotvarem a matricí, se pro výpočet poloměru polotovaru  $R_p$  používá vztah:

$$R_p = R_L - y \quad (2.3)$$

$R_L$  ... poloměr lemovacího profilu [mm]

$y$  ... délka neutrální plochy před lemováním [mm], vypočtená ze vzorce:

$$y = r + \sqrt{r^2 - 2 \cdot R_L \cdot Y} \quad (2.4)$$

$r$  ... poloměr zakřivení neutrální plochy [mm]

$Y$  ... délka neutrální plochy po lemování [mm]

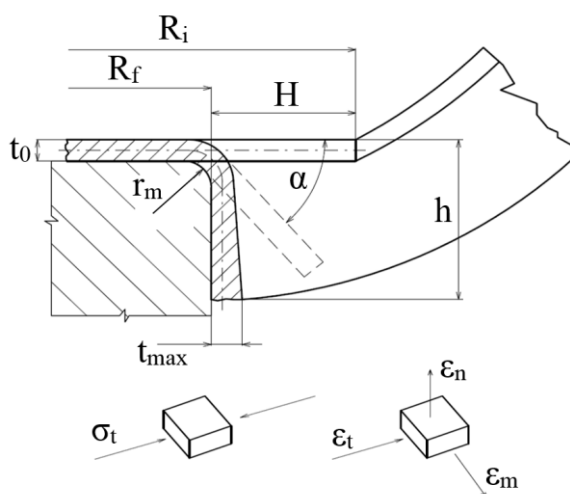
$R_L$  ... poloměr lemovacího profilu [mm]

Při tváření titanových a hořčíkových slitin je využíváno ohřevu. Pro lemování s ohřevem se používají buchary, padací kladiva a vřetenové lisy. Tento typ lemu má typické využití pro plechovou karoserii automobilů či letadel, předně k vytvoření těsně přiléhavých spojů odolávajících vlivu vysokotlakého namáhání. Ukázky vydutého lemu jsou na obr. 26.



Obr. 26 Příklady vydutého lemu [36]

### 2.2.3 Vypuklý lem [18], [21], [32], [36], [37], [38]



Obr. 27 Geometrie vypuklého lemu [39]

Jedná se o přírubu, kde obvodové zakřivení vyčnívá směrem ven. Po obvodu tohoto vypuklého zakřivení dochází k nadměrnému tlakovému namáhání, které je největší po okraji vnitřního poloměru ohybu a má za následek jeho zvrásnění. Na vnějším poloměru ohybu vzniká i tahové napětí, které může způsobovat praskání. Poloměr, délka a úhel ohybu jsou primárně omezeny množstvím deformace. Dále deformace vychází z typu, tloušťky a tvrdosti materiálu a způsobu výroby. Geometrické parametry jsou uvedeny na obr. 27.

Zvlnění je považováno za nejčastěji vznikající defekt u vydutého lemu. Lze mu předejít omezením délky příruby, větší tloušťkou plechu, to poskytuje snadnější posuvy vazeb uvnitř materiálu, a snížením vůle mezi lisovníkem a matricí.

Lem je dělen na dvě oblasti, první vzniká podél raznice s válcovitým vybráním a druhá je rovná část příruby. V první části je úhel ohybu závislý na tloušťce materiálu a v druhé už není její funkcí, vzniká prostá napjatost a radiální napětí je nulové.

Pokud se jedná o anizotropní materiál a vzájemné tření mezi polotvarem a matricí je zanedbáno, tak pro poloměr výchozího polotovaru  $R_p$  platí vztah:

$$R_p = R_L + y \quad (2.5)$$

$R_L$  ... poloměr lemovacího profilu [mm]

$y$  ... délka neutrální plochy před lemováním [mm], vypočtená ze vzorce:

$$y = -r + \sqrt{r^2 + 2 \cdot R_L \cdot Y} \quad (2.6)$$

$r$  ... poloměr zakřivení neutrální plochy [mm]

$Y$  ... délka neutrální plochy po lemování [mm]

$R_L$  ... poloměr lemovacího profilu [mm]

Délka lemu musí být krátká ve srovnání s poloměrem obvodového zakřivení, v opačném případě se změni zakřivení v radiálním směru a poruší se předpoklad prosté napjatosti. Ukázky vypuklého lemu jsou znázorněny na obr. 28.



Obr. 28 Příklady vypuklého lemu [36]

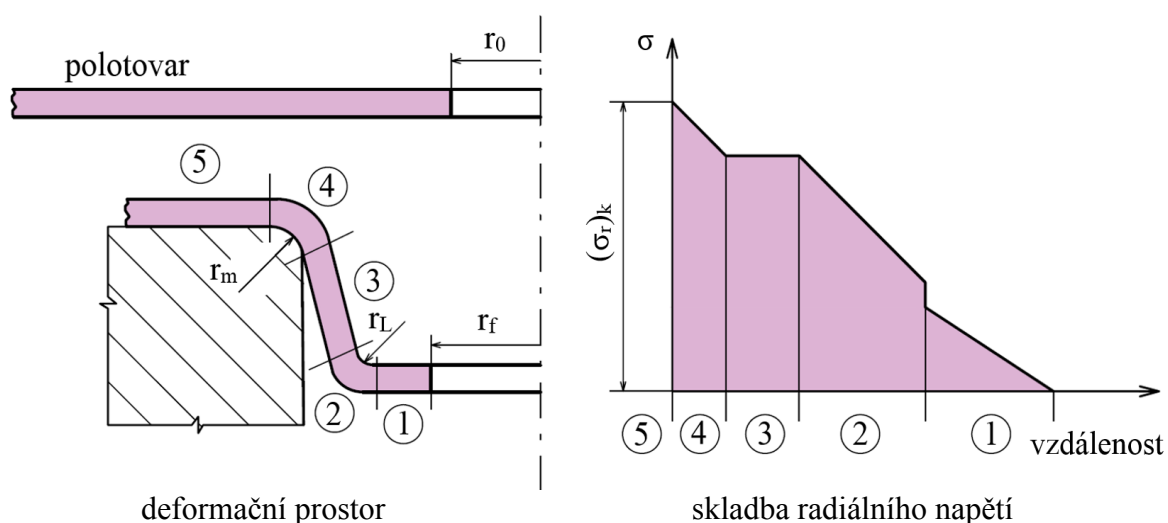
#### 2.2.4 Lemování otvorů [28], [31], [33]

Kromě zaoblení vnějších ostrých hran vystřižených či jinak předpřipravených dílců lze lemování využít i k zahnutí a vyztužení vnitřních otvorů. Nejčastěji se jedná o odlehčovací otvory nebo otvory určené k vytvoření spoje, do nichž je možné následně zhotovit i závit. Pro lemování otvorů se využívá dvou základních typů lemu a to miskového a válcového, oba mají geometricky shodné přechodné stádium, které má v půdorysném průmětu tvar mezikruží.

Deformační charakter je trojosý a dochází ke zkrácení vláken v radiálním směru, k prodloužení vláken v obvodovém směru a k redukci tloušťky plechu. Na začátku procesu se plech ohýbá přes lisovnici o poloměru zaoblení  $r_m$  a nedochází k posuvu, plech se pouze

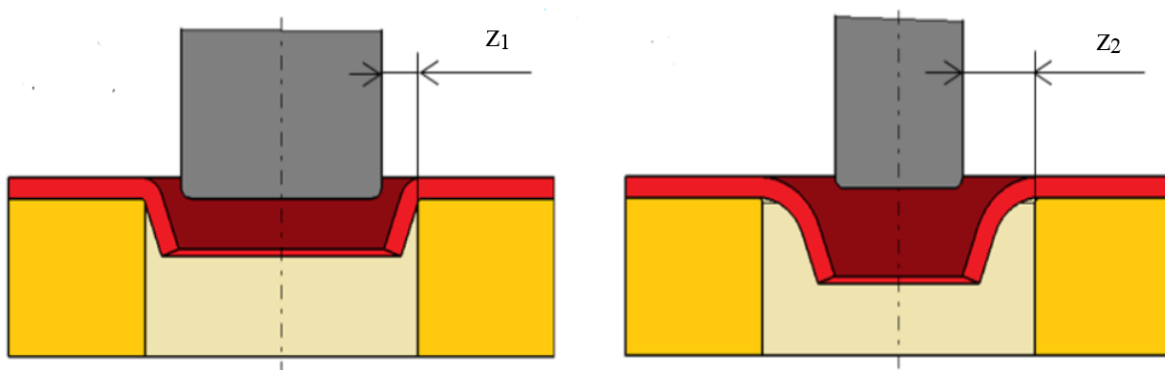
nabaluje. Poloměr otvoru se zvětší z původní hodnoty otvoru na polotovaru  $r_0$  na obecnou hodnotu  $r$ . Plech se posouvá přes poloměr lisovniku  $r_L$  a zároveň se přemísťuje ohnisko deformace. Jedná se o ohyb doprovázený pásovým třením.

Deformační prostor a radiální napětí v jednotlivých úsecích je uvedeno na obr. 29. První úsek odpovídá průběhu ideálního radiálního napětí, ve druhém úseku dochází k navýšení napětí důsledkem ohybu a pásovým třením přes čelo lisovniku a čtvrtý úsek zohledňuje nárůst napětí způsobený nabalením plechu podél matrice. Maximální hodnota napětí v průběhu tváření je označována jako  $(\sigma_r)_K$  a představuje tzv. komplexní radiální napětí, které se dále využívá při stanovení potřebné síly pro tvorbu lemu.



Obr. 29 Průběh radiálního napětí [28]

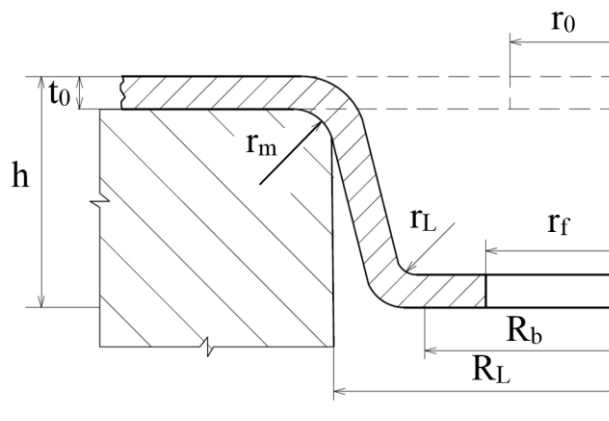
Konečný tvar lemu ovlivňuje mnoho faktorů, jako jsou materiálové vlastnosti, tloušťka plechu a geometrie lemu, především jeho výška, jednotlivé poloměry, druh lemu, kontaktní tření či stav napjatosti. Významný vliv má i kvalita povrchu předzhotoveného otvoru. Hrana by měla být bez poškození a zátrhů, vzniklých prostřížením či vrtáním otvorů. Nevýhodou je snížení plastičnosti materiálu vlivem předchozího zpevnění. Značný vliv má také použití spodního přidržovače během procesu. Při jeho aplikaci vzniká výhodnější stav napjatosti v zóně hrany předzhotoveného otvoru.



Obr. 30 Vliv mezery na tvar lemu [28]

Nejvíce je výchozí tvar lemu ovlivněn mezerou mezi matricí a lisovníkem, což je zobrazeno na obr. 30. Geometrie lisovníku je v obou případech stejná. V polotovarech jsou za pomoci sduženého nástroje prostřiženy otvory o stejné velikosti. Liší se pouze velikostí mezery ( $z_1 < z_2$ ), tím se změní tvar a délka ohybové křivky. U první varianty má menší poloměr než v druhém případě.

● Miskový lem – tento typ lemu se vytváří lisovníkem s plochým nebo zaobleným tvarem čela. Konečný tvar lemu je určen finálním poloměrem  $r_f$  nebo výškou misky a odpovídá mu geometrický tvar uvedený na obr. 31. Hodnota ohýbací síly je rovna fázi, ve které se vytváří miska, ale není ještě dokončena na požadovaný rozměr. Síla zatěžuje průřez svislé stěny a přemáhá deformační odpor, který je dán hodnotou  $(\sigma_r)_K$ .



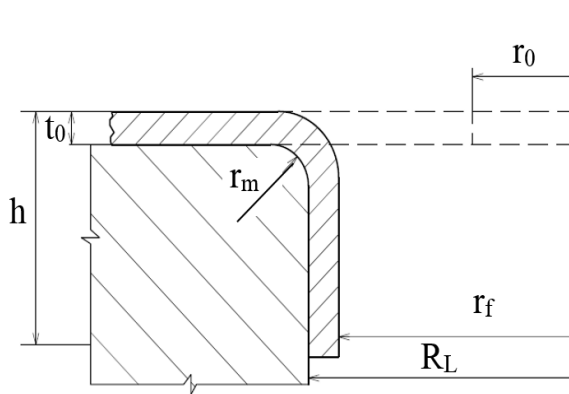
Obr. 31 Geometrie miskového lemu [28]

Pro celkovou sílu platí vztah:

$$F = (\sigma_r)_K \cdot t_0 \cdot \pi \cdot (R_L)_s \cdot 2 \quad (2.7)$$

$(\sigma_r)_K$  ... komplexní radiální napětí [MPa]  
 $t_0$  ... výchozí tloušťka plechu  
 $(R_L)_s$  ... poloměr střední křivky válcové stěny lemu [mm]

● Válcový lem – přechodná geometrie tohoto lemu se postupně mění. Poloměr lemu se nejdříve zvětší na hodnotu  $R_b$  a pak se dále zvětšuje do doby, než se veškerý materiál ohne přes poloměr lisovníku  $r_m$  a vytvoří hrdlo o poloměru  $R_L$ . Geometrie lemu je zobrazena na obr. 32. Síla se stanoví podobně jako u miskového lemu ze vztahu (2.5), s tím rozdílem, že pomocí komplexního radiálního napětí pro ploché dno lisovníku je zohledněno zpevnění a ohyb přes hranu lisovnice.

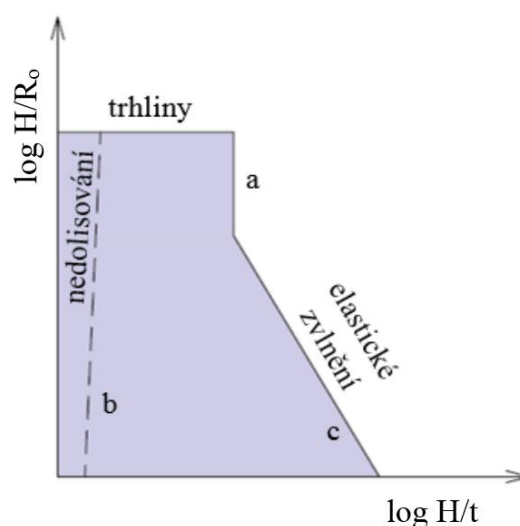


Obr. 32 Geometrie válcového lemu [28]

## 2.3 Mezní tvářitelnost [29], [34]

Maximální dosažitelné rozměry tvářeného dílce určují mezní stupeň deformace (přetvoření), pro daný materiál, geometrický tvar a technologii. K určení limitního stupně deformace se v praxi používají tzv. diagramy mezního stupně přetvoření (DMSP). Tyto diagramy určují hranici mezi výlisky, které se za určitých podmínek dají vyrobit bez defektů a výlisky, které nelze zhotovit bez vzniku vad. Určují technologickou tvářitelnost a jejich souřadný systém je tvořen důležitými geometrickými rozměry dílců ve tvaru jednoduchých funkčních vztahů.

V drtivé většině případů znázorňují křivky DMSP hranici nukleace trhlin. Složitější diagramy jsou složeny z více mezních křivek, jako počátek vzniku trhlin, hranice pro nedokonalé dotvarování výlisku atd. Výrobní proces je poté posuzován více činiteli. Příkladem takového diagramu je diagram Woodova typu určeného pro výrobu vydutých lemů nepevným nástrojem, který je uveden na obr. 33. Jsou zde znázorněny tři meze, které v logaritmických souřadnicích jsou zobrazeny jako přímky.



Obr. 33 DMSP Woodova typu pro výrobu vydutých lemů [29]

Jedná se o mez trhlin (přímka a)

$$\log \frac{H}{R_0} = m_w \cdot \log \frac{H}{t} \quad (2.8)$$

mez nedolisovaných lemů (přímka b)

$$\log \frac{H}{R_0} = 17 \cdot \log \frac{H}{t} \quad (2.9)$$

a mez elastického zvlnění (přímka c)

$$\log \frac{H}{R_0} = -2 \cdot \log \frac{H}{t} \quad (2.10)$$

H	...	velikost přesahujícího okraje [mm]
R <sub>0</sub>	...	poloměr zaoblení lisovníku [mm]
t	...	tloušťka plechu [mm]

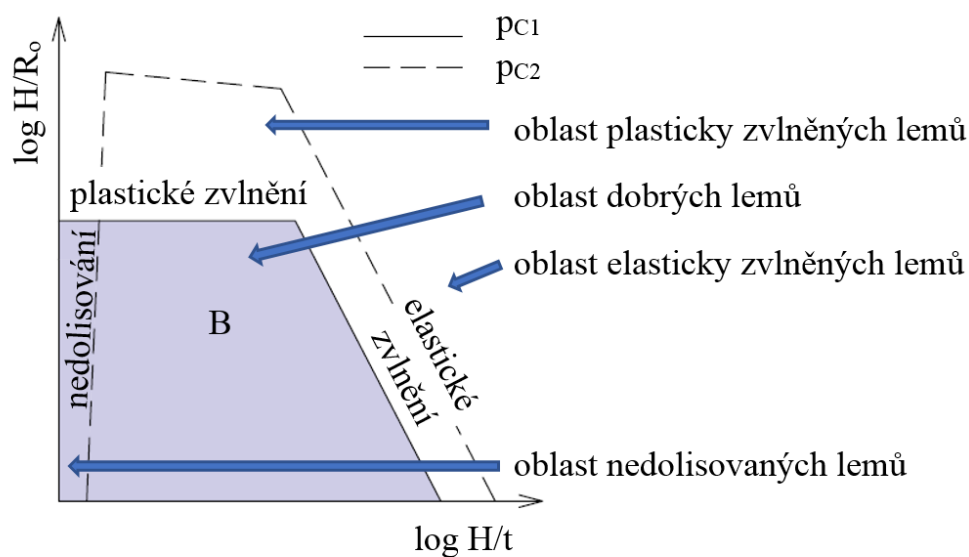
Přímka (a) přechází při stanoveném poměru H/t v přímku (b), která definuje hranici vzniku trvalých vln. Tato hranice se dále chová konstantně bez závislosti na poměru h/t, ale zůstává funkcí poměru E/Re v tahu. Při jejím překročení dochází k extrémnímu zvýšení tvářecí tlakové síly a to má za důsledek tvorbu trhlin.

Pole dobrých výlisků se nachází uvnitř, v ploše ohraničené danými přímkami. Zvýšení měrného tlaku zde neovlivní pozici mezní přímky trhlin, ale dojde k rozšíření pole dobrých výlisků v důsledku posunutí přímky (b) a (c).



Při tažení vypuklých lemů je ve stěně lemu tlaková složka napjatosti výrazná. Důsledkem ztráty stability se tvoří vlny, jejichž vznik lze potlačit zvýšením měrného tlaku nástroje. Na obr. 34 je uveden diagram Woodova typu, na kterém je vidět zvětšení pole dobrých výlisků pro růst měrného tlaku.

K lemování vydutých obrysových křivek dílců se nejčastěji používá nepevný nástroj nebo přímotlaké kapalinové lisy, jejichž princip je založen na měrném tlaku. Pokud je nedostatečný, nemusí dojít k dotvarování lemu na  $90^\circ$ . Poměrně častým defektem těchto součástí kromě vzniku trhlin je i nedolisoání.



Obr. 34 DMSP Woodova typu pro vypuklý lem,  $p_{C2} > p_{C1}$  [29]

### 3 STROJE A NÁSTROJE [1], [2], [3], [6], [10], [13], [14], [15], [23], [25], [26], [27], [30], [36]

Výroba lemu je flexibilní technologie, ve které lze použít různé typy nástrojů, přípravků a strojů. Vše je závislé zejména na tvaru daného lemu, respektive zhotoveného dílce, dále na dílenských možnostech, množství vyráběných kusů a tloušťce plechu.

#### 3.1 Lemování na víceúčelových strojích [1], [6], [13], [14], [23], [26], [36]

Jednoduchý přímý lem lze zhotovit na ohýbacím stroji. Tyto stroje jsou vyrobeny z masivní litinové konstrukce. Délka lemu je závislá na rozměrech příslušné ohýbačky. Plech je upnut pomocí excentrických čepů mezi horním pohyblivým dílem a spodním nepohyblivým dílem. Ohyb je prováděn pomocí přední ohýbací čelisti. Nevýhodou těchto strojů je malá výrobní přesnost, naopak výhodou je relativně nízká cena. Používají se na údržbách, opravnách a v zámečnických dílnách.



Obr. 35 Lemovací nástroj [14]

velikosti ohýbací síly po celé délce zdvihu. Na těchto strojích je lem tvářen najednou po celé délce. Výhodou je vysoká rychlost zpracování a vysoká kvalita tvářeného povrchu. Nástroj se vyznačuje dlouhou životností díky robustní konstrukci pracovních částí. Lze je použít na výrobu dopravních značek různých tvarů, např. trojúhelníků, kruhů či šipek. Do lisu je také možno upnout sružený nástroj, nejčastěji se jedná o kombinaci střižného a lemovacího nástroje.

K lemování lze využít také běžných lisů, kdy se na pracovní stůl a do beranu lisu upne lemovací nástroj (obr. 35). Mechanické lisy využívají setrvačnick pro ukládání energie potřebné pro ražení. Nevýhodou těchto lisů je závislost hnací síly na délce zdvihu. Častěji se pro lemování využívají hydraulické lisy, uvedené na obr. 36, které používají pro pohon beranu písty s tlakovým olejem, čímž docílí konstantní



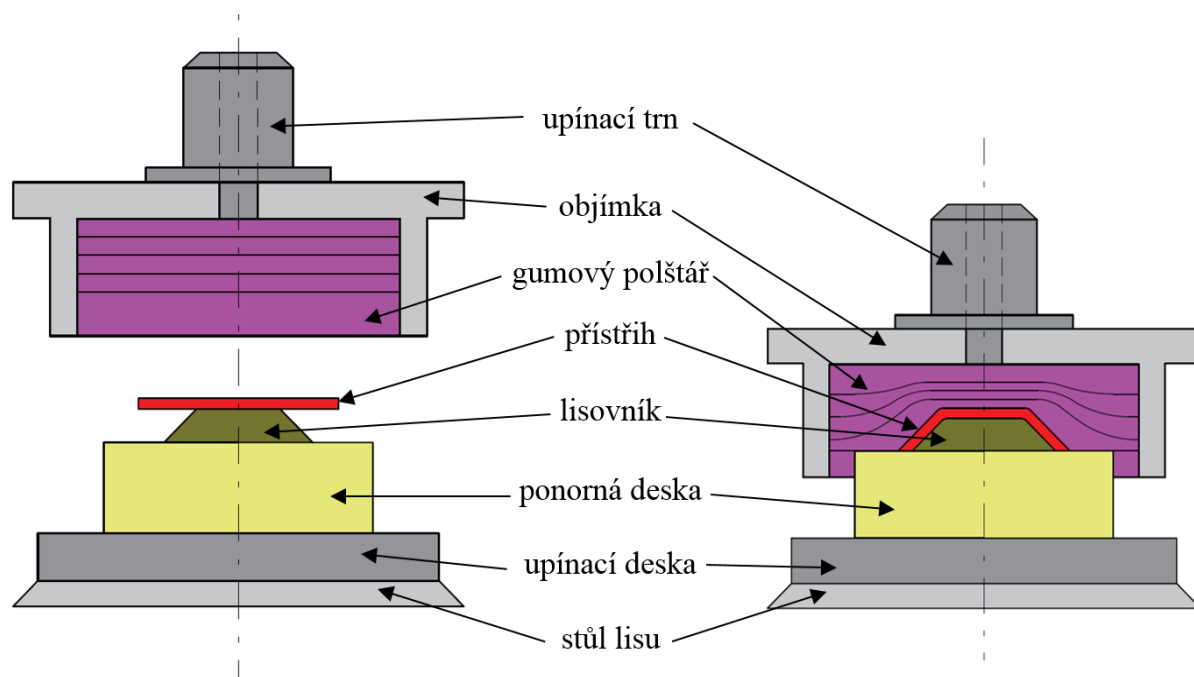
Obr. 36 Hydraulický lis [23]



V případě užití nepevného nástroje lze pro lemování okraje polotovaru použít metodu Guerin, kdy tváření probíhá v tzv. uzavřeném nástroji. Na hydraulickém lisu v ocelové skříni jsou upevněné desky z elastické pryže. Tato část nástroje se pohybuje proti pevnému lisovníku a jejím stlačením dochází k ohnutí přesazeného okraje plechu. Tato metoda se využívá také při stříhání, ohýbání a děrování. Z důvodu rychlého opotřebení nástroje se používá pro kusovou a malosériovou výrobu. Má univerzální použití pro různé rozměry a tvary lisovníku. Výhodou je snadné seřízení stroje, nedochází ke zvlnění na dílci a jedná se o poměrně levnou metodu. Na obr. 38 je uvedeno schéma metody Guerin. Daná technologie se v praxi používá především pro letecký a vesmírný průmysl. Lis pro metodu Guerin je zobrazen na obr. 37.



Obr. 37 Lis pro metodu Guerin[36]



Obr. 38 Zařízení pro tváření metodou Guerin [26]

### 3.2 Výhradně lemovací stroje [2], [3], [10], [15], [25], [27], [30]

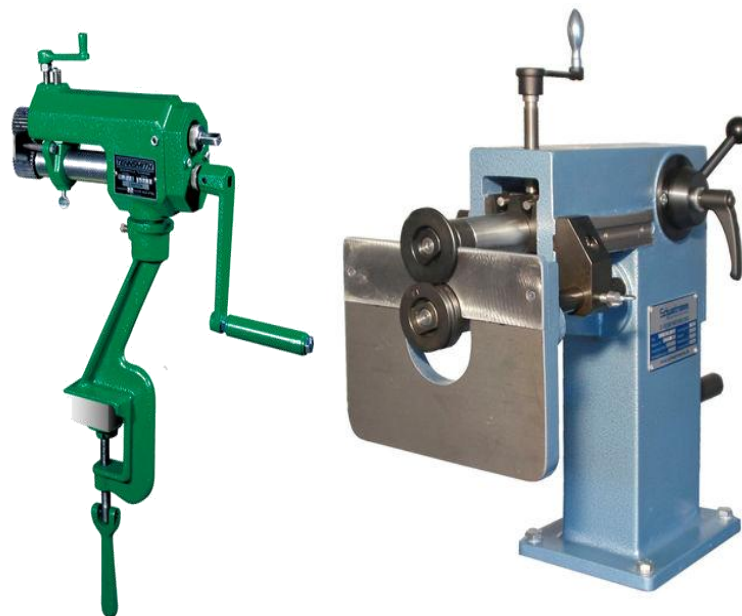
Jedná se o jednoúčelové stroje, na kterých se provádí pouze jedna operace a to lemování. Dnes je na trhu k dispozici široká škála těchto strojů a nástrojů, ať už v ručním či strojním provedení. Dále jsou k dispozici i CNC stroje s elektrickými a hydraulickými pohony. Princip tvorby lemu je vždy stejný, plech je lemován pomocí dvou či více válců působících proti sobě.

### 3.2.1 Ruční lemovačky [10], [15], [30]

V podstatě jde o nejjednodušší lemovací nástroje. Výhodou je snadná obsluha a manipulace. Plech je uchycen mezi dvě pohyblivě uložené válcové hlavy a je ho možné přivádět v obou směrech. Princip lemování je zachycen na obr. 39. Dalšími komponenty jsou nosník, ruční klička a doraz, který je zpravidla upravený vytvrzením. Zařízení je výškově a osově nastavitelné. Pohon je mechanický a je realizován ruční klikou na spodní hřídeli tak, že se klika a výlisek pohybují synchronně. Válec se nastaví posunutím nebo natočením horního hřídele. Hladkost lemu je zaručena bezúdržbovými jehlovými ložisky. Nosník se vyrábí z litiny a tělo nástroje je odlito z hliníku, jehož předností je lehkost. Tento typ ručních lemovaček je používán zejména pro montážní práce, v zámečnických dílnách a při různých údržbách a opravách.



Obr. 39 Ukázka lemování ruční lemovačkou [30]



Obr. 40 Ruční lemovačky [10]

Ruční lemovací nástroje se nachází na trhu ve dvou provedeních, buď se stojanem anebo stolové, které se upevňují na desku pracovního stolu pomocí klíče a stojanové lavice. Oba typy jsou vyobrazeny na obr. 40.

Speciálním typem ručních obrobacích nástrojů jsou kompaktní mobilní kleště (obr. 41). Pokrývají rozsah tloušťky plechu od 2 - 7 mm konstrukční oceli a 2 - 5 mm nerezové oceli. Mají snadno vyměnitelné vložky přizpůsobené práci v ruce. Plusem je univerzální použití a snadná manipulace, nástroj je držen v jedné poloze a rukou veden podél okraje plechového dílu. Kleště jsou také využívány k lemování okrajů vysokotlakých nádrží a nádob.



Obr. 41 Lemovací kleště [10]

### 3.2.2 Motorizované lemovačky [10], [15], [25]

Od ručních lemovaček se liší přidáním elektrického pohonu a robustní konstrukcí. Jsou složené z těžkého litého tělesa a ocelového stojanu. Masivní základová deska usnadňuje montáž zařízení. Tvářecí tlak je ovládán klikou v horní části stroje. Stroj je poháněn brzdovým více-rychlostním motorem pomocí klínového řemene vedoucího přes olejovou lázeň šnekového kola. Rychlost je plynule nastavitelná pomocí nožního spínače. Řídicí systém elektrické energie je umístěn ve spodní části stojanu. Příklad konstrukce poháněných lemovaček je uvedena na obr. 42.



Obr. 42 Motorizované lemovačky [10]

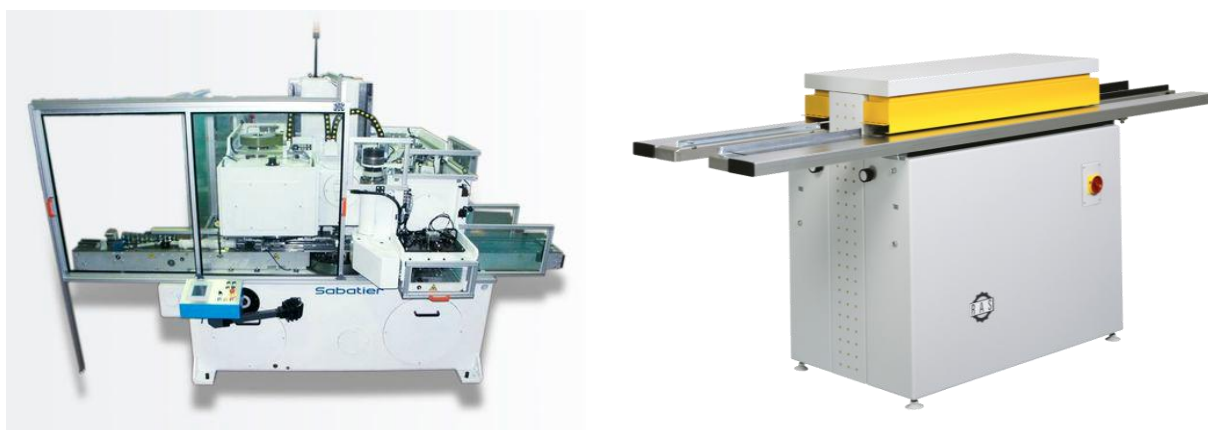
### 3.2.3 Automatické lemovačky [2], [10], [15]

Automatické lemovačky jsou kompaktní spolehlivé stroje nabízející vynikající účinnost. Rychlé, bezpečné a nákladově efektivní. Plní všechny potřebné lemovací operace pro hranolové (obr. 43) a podlouhlé pásy plechu. Mají uplatnění ve vzduchotechnickém průmyslu pro výrobu potrubí a kanálů nebo dalších klempiřských součástí. Vysoce kvalitní profily jsou poskytovány hřídelemí válců uložených na axiálních a radiálních ložiskách.



Obr. 43 Lem hranolu plechu [10]

Na trhu lze nalézt stroje s jedním párem činných válců nebo s celou sadou válcových hlav. Válce jsou vyrobeny z kvalitní speciální cementované oceli. Volitelný systém automatického vedení napomáhá materiálu vytvořit konzistentní výšku lemu. Tichý a plynulý chod je garantován vysoce jakostním převodovým motorem, který přenáší pohyb bez řemenného převodu přímo na pracující hlavy. Vstupní vodící soustava je kalená, odolná proti opotřebení a není ve styku s ostrými hranami plechového materiálu. Nastavitelná vyrovnávací složka umožňuje rovnání či zakružování na poloměry bočnic lemovaného dílce. Automatické stroje pro lemování plechu jsou zpodobněné na obr. 44.

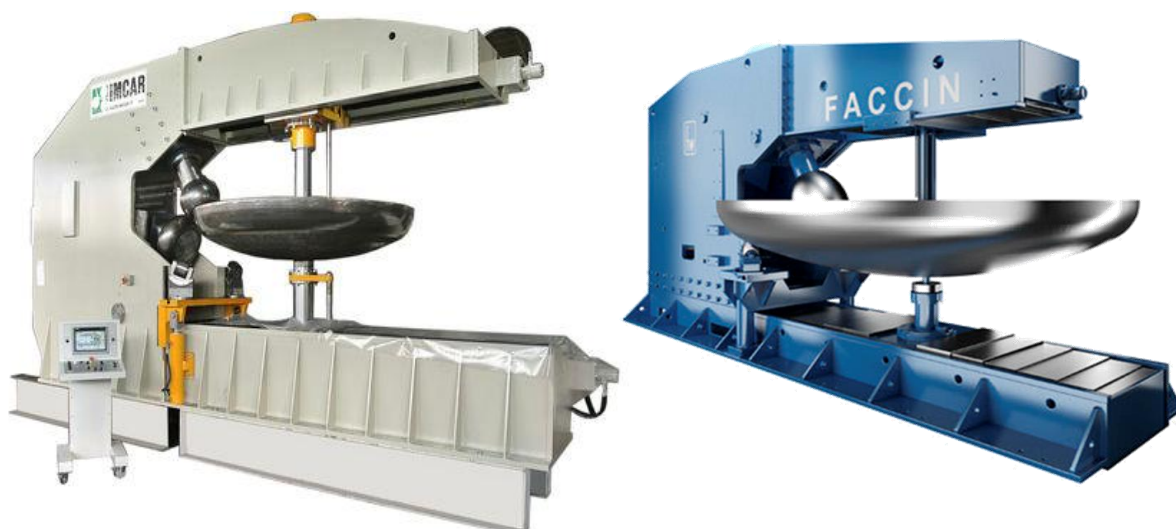


Obr. 44 Automatické lemováčky [10]

### 3.2.4 CNC lemováčky [3], [10], [27]

● Lemováčky typu C – funkční části jsou vyrobeny z kované legované oceli, která zajišťuje delší životnost. Svařená konstrukce rámu stroje je vestavěná do tvaru písmene C (obr. 45). Automatické obrubování je zajištěno číslicově řízenou hydraulikou. Celý systém je chráněn proti přetížení bezpečnostními ventily. Tyto stroje umožňují lemování kruhových a eliptických výstřižků do maximální tloušťky 50 mm. Polotovar je upevněn hroty na pohyblivém pásu. Během tvářecího procesu vykonává obecný rovinný pohyb, translační rovnoběžně s ramenem a saněmi stroje a rotační kolem své osy. Obrubovacími aktivními prvky jsou dvě rotační hlavy.

Primárně jsou ovládány automatickým pracovním cyklem, čímž je zaručena co největší jednoduchost použití během lemování i pro nezkušenou obsluhu. Operátor může sledovat krok za krokem probíhající pracovní proces s možností regulace pohybu obsluhou ovládacího pultu. Potenciometry měří tlak a zobrazují všechny signály na dotykovém displeji ovládacího panelu.

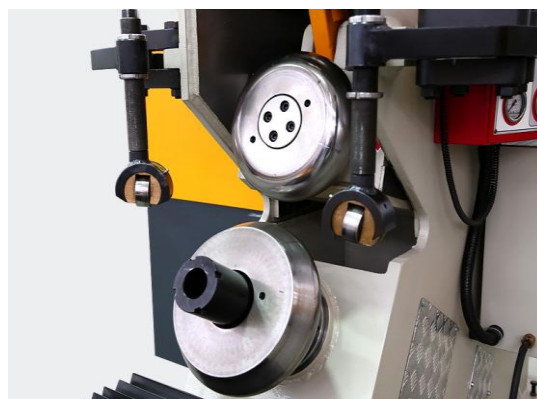


Obr. 45 Lemováčky typu C [10]



Hydraulické lemovačky (obr. 48) - tento typ lemovacích strojů svojí konstrukcí připomíná hlavy tanků. Praktické užití lze nalézt při zhotovení železničních kolejí, silničních cisteren, skladovacích nádrží atd. Obsahují vyměnitelné lemovací hlavy a to až do průměru tří metrů.

Stroje mají pevný svařený ocelový rám, který je schopen odolat tepelnému namáhání a zajišťují vysokou pevnost a stabilitu během provozu. Polotovár je upevněn a otáčen na manuálním nosiči, na pohyblivém pásu. Zařízení je výškově nastavitelné a zcela automatizované pomocí ovládacího panelu. Horní tvarovací válec je vyroben z indukční kalené oceli s vysokým odporem a pohybuje se nahoru a dolů. Spodní válec nebo deska je upevněna na rámu a tlačí proti plechu a tvarovací hlavě. Obě pracovní části (obr. 46) jsou poháněny motorem s radiálními písty, které umožňují použití proměnlivé rychlosti otáčení. Nosná ramena slouží jako podpěrná struktura.



Obr. 46 Lemovací válce [27]



Obr. 47 Ukázka lemování na hydraulické lemovačce [27]

Hydraulický systém je umístěn na zadní popř. boční straně přístroje. Nachází se na něm základní komponenty jako čerpadlo, olejová nádrž, filtr, hladinoměr, termostat, tepelný výměník, regulační a elektromagnetické ventily.

Elektrická zařízení jsou umístěná na rámu stroje v blízkosti elektrického ovládacího panelu. Pracovní pohyby mechanismu jsou kontrolovány a blokovány koncovými spínači, lze jimi předejít havárii a zajistit tak větší bezpečnost obsluhy. Koncové spínače slouží ke kontrole všech pohybů stroje. Zařízení bývají doplněna tlakovými monometry. Ukázka z provozu je uvedena na obr. 47.



Obr. 48 Hydraulické lemovačky [27]

## 4 ZÁVĚRY

Lemování je tvářecí metoda, která vychází z teorie ohýbání. Jedná se o ohyb přesahujícího okraje přes hranu ohybnice s cílem vytvořit daný úhel ohybu, nejčastěji 90° a 180°.

Dílce opatřeny lemy nás obklopují a potkávají v každodenním životě. Může se jednat o bezpečnostní lemy, které spotřebitele chrání proti pořezání, škrábnutí či jiným úrazům způsobenými ostrými hranami plechových součástí. Většina lemů mimo jiné zastává i pevnostní funkce a používají se pro vyztužení okrajů, aby nedocházelo ke snadnému poškození plechů, např. naštípnutí či nežádoucímu prohnutí. Některé lemy mohou tvořit dekorativní a ozdobný lem součástí. A v neposlední řadě bývají také uplatňovány při zhotovení šroubových, nýtovaných a jiných spojů plechového materiálu. Těchto spojů se využívá především u vysokotlance namáhaných dílců. Spoje vytvořené jinými konvenčními metodami, jako je svařování či lepení, by nápor způsobený vysokým tlakem nemusely vydržet.

Co se týká strojů, pro konstrukčně jednodušší tvary lemů se využívají víceúčelové stroje, kupříkladu ohýbačky a lisy, výhoda těchto strojů spočívá především v nižších nákladech na výrobu. Pro výrobu složitějších lemů jsou vyráběny speciální lemovací stroje, a to jak v ručním provedení, tak automaticky ovládané či s hydraulickými pohony.

Kvalita lemu se odvíjí podle použité lemovací metody. U pevného nástroje je dílec vyroben s větší precizností, geometrickou přesností a vzniku menšího odpružení než u nepevného nástroje. Naopak tváření elastickým nástrojem je několikanásobně levnější metodou, dále je tu možnost kombinace s jinými plošnými tvářecími metodami díky univerzálnosti nástroje. Poměrně novou metodou je lemování pomocí elektrického proudu a magnetického tlaku. Předností je menší náchylnost k praskání a vzniku dalších nežádoucích defektů.

Přestože jsou v dnešní době ochranné a zpevňující lemy na plechových součástích považovány za samozřejmost, tak i v této oblasti tváření se dají do budoucna předpokládat mnohá zlepšení a jistá modernizace.

## SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ [8]

1. *Accessscience: Sheet metal forming* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.accessscience.com/content/sheet-metal-forming/619200>
2. *Albiz* [online]. [cit. 2017-03-20]. Dostupné z: <http://perm.all.biz/cs/lemovacky>
3. *Alibaba.com* [online]. [cit. 2017-03-29]. Dostupné z: [https://shuipo.en.alibaba.com/product/60140379956209981500/CNC\\_Tank\\_Head\\_Spinning\\_Machine\\_CNC\\_Dish\\_End\\_Flanging\\_Machine\\_sheet\\_metal\\_flanging\\_machines.html](https://shuipo.en.alibaba.com/product/60140379956209981500/CNC_Tank_Head_Spinning_Machine_CNC_Dish_End_Flanging_Machine_sheet_metal_flanging_machines.html)
4. ASNAFI, Nader. On stretch and shrink flanging of sheet aluminium by fluid forming. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1999, 96(1), 198-214 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1016/S0924-0136(99)00352-0. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S09240136990>
5. BAČA, Jozef, Jozef BÍLIK a Viktor TITTEL. *Technológia tvárnenia: časť Plošné tvárnenie*. Bratislava: Slovenská technická univerzita v Bratislave, 2004, 97 s. Edícia skript. ISBN 8022721565.
6. BŘEZINA, Richard a Jiří PETRUŽELKA. *Úvod do tváření II*. Ostrava: Vysoká škola báňská - Technická univerzita, 2002. ISBN 8024800683.
7. BŘEZINA, Richard a Radek ČADA. *Speciální technologie: Technologie a tváření*. Ostrava: Vysoká škola báňská, 1992, 249 s. ISBN 807078122X.
8. CITACE PRO. *Generátor citací* [online]. 2013 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://citace.lib.vutbr.cz/info>
9. DEWANG, Yogesh, M.S. HORA a S.K. PANTHI. Influence of Blank Holding Force on Stretch Flange Forming of Aluminum Alloy. *Materials Today: Proceedings* [online]. Elsevier, 2015, 2(4-5), 1934-1941 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1016/j.matpr.2015.07.157. ISSN 22147853. Dostupné z: <http://www.Science direct.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S2214785315004022#>
10. *Direct Industry* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.directindustry.com/>
11. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ a Karel NOVOTNÝ. *Technologie tváření: plošné a objemové tváření*. Vyd. 5., V Akademickém nakladatelství CERM 3. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2013, 169 s. ISBN 9788021447479.
12. DVOŘÁK, Milan, František GAJDOŠ, Milan HORÁČEK, Ladislav ZEMČÍK, Bohumil KANDUS, Jaroslav KUBÍČEK, Evžen VYPLAŠIL a Ladislav ŽÁK. *Technologie II*. Vyd. 3., dopl., v Akademickém nakl. CERM 2. vyd. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2004, 238 s. ISBN 8021426837.
13. *Engineering: Stamping* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www. engineering .com/Library/ArticlesPage/tabid/85/ArticleID/143/Stamping>
14. *Feltrin a Guidolin* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.feltrine guidolin.it/en/folding-dies-and-flanging-dies/>
15. FOREJT, Milan a Miroslav PÍŠKA. *Teorie obrábění, tváření a nástroje*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2006. ISBN 80-214-2374-9.
16. *Formetal: plechotvářecí stroje* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www. formetal.cz/o-nas/reference>

17. FRISCHHERZ, Adolf a Paul SKOP. *Technologie zpracování kovů 1: základní poznatky*. 2. vyd. Praha: SNTL, c1996, 268 s. Správa přípravy učňů. ISBN 8090211003.
18. HU, P., D.Y. LI a Y.X. LI. Analytical models of stretch and shrink flanging. *International Journal of Machine Tools and Manufacture* [online]. Elsevier, 2003, 43(13), 1367-1373 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1016/S0890-6955(03)00150-0. ISSN 08906955. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0890695503001500>
19. CHU, Y-Y a R S LEE. Effects of blank design on the electromagnetic flanging process. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part B: Journal of Engineering Manufacture* [online]. SAGE Publications, 0011n. 1., 224(1), 75-86 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1243/09544054JEM1579. ISSN 09544054. Dostupné z: <http://search.proquest.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/docview/366293077?OpenUrlRefId=iinfo:xri/sid:primo&accountid=17115>
20. LAI, Zhipeng, Xiaotao HAN, Quanliang CAO, Li QIU, Zhongyu ZHOU a Liang LI. The Electromagnetic Flanging of a Large-Scale Sheet Workpiece. *Applied Superconductivity, IEEE Transactions on* [online]. USA: IEEE, 1406, 24(3), 1-5 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1109/TASC.2013.2285443. ISSN 10518223. Dostupné z: <http://ieeexplore.ieee.org.ezproxy.lib.vutbr.cz/document/6627961/?reload=true>
21. LE MAOÛT, N., S. THUILLIER a P. Y. MANACH. Drawing, flanging and hemming of metallic thin sheets: A multi-step process. *Materials and Design* [online]. Elsevier, 2010, 31(6), 2725-2736 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1016/j.matdes.2010.01.030. ISSN 02613069. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0261306910000440>
22. LOMOVSKOI, O., V. MOISEEV, A. PLOTNIKOV a A. SHAROV. Material stress strain behaviour and elastomer pressure under constrained bending of sheet edges. *Russian Aeronautics (Iz VUZ)* [online]. New York: Allerton Press, 2015, 58(1), 81-87 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.3103/S1068799815010134. ISSN 10687998. Dostupné z: <https://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/openurl?page=81&volume=58&issn=1068-7998&issue=1&genre=article>
23. *Lucas: Flanging machines* [online]. [cit. 2017-04-11]. Dostupné z: <http://www.lucas.eu/2512/3/6/index.html>
24. LUO, Wenyong, Liang HUANG, Jianjun LI, Xianlong LIU a Zhiqiang WANG. A novel multi-layer coil for a large and thick-walled component by electromagnetic forming. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1411, 214(11), 2811-2819 [cit. 2017-03-30]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2014.05.023. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S0924013614001988>
25. NOVOTNÝ, Karel. *Tvářecí nástroje*. Brno: Vysoké učení technické, 1992, 186 s. ISBN 8021404019.
26. PÁSEK, Vladimír. *Pokrokové způsoby tváření*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1964.
27. *ŞAHİNLER METAL A.Ş.* [online]. Bursa [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.sahinlermetal.com/en/index>



28. SAMEK, Radko, Eva ŠMEHLÍKOVÁ a Zdeněk LIDMILA. *Speciální technologie tváření*. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2011, 155 s. ISBN 9788021444065.
29. SAMEK, Radko. *Analýza mezního stavu plastičnosti a technologické tvařitelnosti*. Praha: VA AZ, 1988.
30. *Schwartmanns Isoliermaschinen* [online]. [cit. 2017-03-19]. Dostupné z: <http://www.schwartmanns.de/de/>
31. STACHOWICZ, F. Estimation of hole-flange ability for deep drawing steel sheets. *Archives of Civil* [online]. 2008, 8(2), 167-172 [cit. 2017-04-21]. ISSN 16449665. Dostupné z: STACHOWICZ, F. Estimation of hole-flange ability for deep drawing steel sheets. *Archives of Civil* [online]. 2008, 8(2), 167-172 [cit. 2017-04-21]. ISSN 16449665. Dostupné z : <http://web.a.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=d7041160-a1c4-44f0-adb171bcef26f013%40sessionmgr4007&vid=2&hid=4104>
32. *Technická univerzita v Liberci: Oddělení tváření kovů a plastů* [online]. [cit. 2017-05-20]. Dostupné z: <http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/info.htm>
33. THIPPRAKMAS, Sutasn a Wiriyakorn PHANITWONG. Finite element analysis of flange-forming direction in the hole flanging process. *International Journal of Advanced Manufacturing Technology* [online]. 2012, 61(5-8), 609-620 [cit. 2017-04-21]. DOI: 10.1007/s00170-011-3721-8. ISSN 02683768. Dostupné z: <http://web.b.ebscohost.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/ehost/pdfviewer/pdfviewer?sid=b2343985-3fba-4a05-8f90-09bc22778d92%40sessionmgr101&vid=1&hid=125>
34. TOMÁŠEK, Jiří. *Směrnice pro stanovení mezních stupňů přetvoření pravidelných tvarů součástí z plechu*. Brno: VUT, 1975.
35. VOSWINCKEL, Holger, Markus BAMBACH a Gerhard HIRT. Improving geometrical accuracy for flanging by incremental sheet metal forming. *International Journal of Material Forming* [online]. Paris: Springer Paris, 1507, 8(3), 391-399 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1007/s12289-014-1182-y. ISSN 19606206. Dostupné z: <https://link.springer.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/article/10.1007/s12289-014-1182-y>
36. *Vyhledavač Google* [online]. [cit. 2016-11-30]. Dostupné z: <https://www.google.cz/>
37. WEN, Tong, Suo ZHANG, Jie ZHENG, Qian HUANG a Qing LIU. Bi-directional dieless incremental flanging of sheet metals using a bar tool with tapered shoulders. *Journal of Materials Processing Tech* [online]. Elsevier B.V, 1603, 229, 795-803 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1016/j.jmatprotec.2015.11.005. ISSN 09240136. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S092401361530>
38. ZHANG, Graco Ellen, Jian YAO, S. JACK HU a Xin WU. Shrink Flanging with Surface Contours. *Journal of Manufacturing Processes* [online]. Elsevier, 2003, 5(2), 143-153 [cit. 2017-03-29]. DOI: 10.1016/S1526-6125(03)70049-8. ISSN 15266125. Dostupné z: <http://www.sciencedirect.com.ezproxy.lib.vutbr.cz/science/article/pii/S1526612503700498#>
39. ŽÁK, Jan, Bohumil BUMBÁLEK a Radko SAMEK. *Speciální letecké technologie I: Určeno pro posl. fak. strojní*. Brno: Československá redakce VN MON, 1990. ISBN 80-214-0128-1.

## SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Označení	Legenda	Jednotka
a	délka volného konce	[mm]
$A_{0U}$	práce při ohybání do tvaru U	[J]
$A_{0V}$	práce při ohybání do tvaru V	[J]
b	šířka polotovaru	[mm]
c	koeficient prodloužení	[mm]
E	modul pružnosti v tahu	[MPa]
$F_{0U}$	ohybová síla při ohybání do tvaru U	[N]
$F_{0V}$	ohybová síla při ohybání do tvaru V	[N]
H	velikost přesahujícího okraje	[mm]
J	moment setrvačnosti daného průřezu	[kg · m <sup>2</sup> ]
L	vzdálenost mezi podporami	[mm]
$l_U$	rameno ohybu při ohybání do tvaru U	[mm]
$l_V$	rameno ohybu při ohybání do tvaru V	[mm]
q	měrný tlak elastomeru	[MPa]
r	poloměr zakřivení neutrální plochy	[mm]
$R_0$	poloměr ohybu	[mm]
Re	mez kluzu ohybaného materiálu	[MPa]
$R_L$	poloměr lemovacího profilu	[mm]
$(R_L)_s$	poloměr střední křivky válcové stěny lemu	[mm]
$r_m$	poloměr zaoblení lisovníku	[mm]
t	tloušťka materiálu	[mm]
$t_0$	výchozí tloušťka plechu	[mm]
x	součinitel posunutí neutrální plochy	[-]
y	délka neutrální plochy před lemováním	[mm]
Y	délka neutrální plochy po lemování	[mm]
Z	potřebný zdvih	[mm]
$\alpha$	úhel ohybu	[°]
$\beta$	úhel odpružení	[°]
$\varepsilon_c$	mezní prodloužení	[mm]
$\mu$	součinitel tření	[-]
$\rho$	poloměr zaoblení neutrální plochy	[mm]
$(\sigma_r)_K$	komplexní radiální napětí	[MPa]
$\varphi$	úhel ohnutého úseku	[°]

## SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklady lemovaných součástí [16], [36] .....	9
Obr. 2 Praktické využití lemování [36] .....	10
Obr. 3 Dílec zpracovaný ohýbaním [36] .....	11
Obr. 4 Zohýbané polotovary [36] .....	11
Obr. 5 Průběh napětí a deformace průřezu $b \times t$ a $\phi D$ [12] .....	12
Obr. 6 Úhel odpružení a rameno ohybu při ohýbání do tvaru U a V [5] .....	13
Obr. 7 Diagram pro určení úhlu odpružení různých materiálů [5] .....	14
Obr. 8 Průběh ohybací síly v závislosti na dráze ohybníku [12] .....	15
Obr. 9 Princip a přípravek pro ohyb do tvaru V [36] .....	16
Obr. 10 Princip a přípravek pro ohyb do tvaru U [36] .....	17
Obr. 11 Porušení materiálu při ohýbání [12] .....	17
Obr. 12 Ohraňování [36] .....	18
Obr. 13 Rovnačky [36] .....	18
Obr. 14 Zakružování [36] .....	19
Obr. 15 Uzavřený lem [36] .....	20
Obr. 16 Otevřený lem [36] .....	20
Obr. 17 Defekty lemu [36] .....	21
Obr. 18 Scéma lemování pevným nástrojem [28] .....	21
Obr. 19 Lemování nepevným nástrojem [28] .....	22
Obr. 20 Princip EMF [20] .....	23
Obr. 21 Kryt mobilního telefonu vyrobený elektromagnetickým lemováním [19] .....	23
Obr. 22 Typy lemů [28] .....	24
Obr. 23 Geometrie přímého lemu [39] .....	24
Obr. 24 Příklady přímého lemu [36] .....	25
Obr. 25 Geometrie vydatého lemu [39] .....	25
Obr. 26 Příklady vydatého lemu [36] .....	26
Obr. 27 Geometrie vypuklého lemu [39] .....	26
Obr. 28 Příklady vypuklého lemu [36] .....	27
Obr. 29 Průběh radiálního napětí [28] .....	28
Obr. 30 Vliv mezery na tvar lemu [28] .....	28
Obr. 31 Geometrie miskového lemu [28] .....	29
Obr. 32 Geometrie válcového lemu [28] .....	29
Obr. 33 DMSP Woodova typu pro výrobu vydatých lemů [29] .....	30
Obr. 34 DMSP Woodova typu pro vypuklý lem, $p_{C2} > p_{C1}$ [29] .....	31
Obr. 35 Lemovací nástroj [14] .....	32
Obr. 36 Hydraulický lis [23] .....	32
Obr. 37 Lis pro metodu Guerin [36] .....	33
Obr. 38 Zařízení pro tváření metodou Guerin [26] .....	33
Obr. 39 Ukázka lemování ruční lemováčkou [30] .....	34
Obr. 40 Ruční lemováčky [10] .....	34
Obr. 41 Lemovací kleště [10] .....	34
Obr. 42 Motorizované lemováčky [10] .....	35
Obr. 43 Lem hranolu plechu [43] .....	35
Obr. 44 Automatické lemováčky [10] .....	36

Obr. 45 Lemovačky typu C [10] .....	36
Obr. 46 Lemovací válce [27] .....	37
Obr. 47 Ukázka lemování na hydraulické lemováčce [27] .....	37
Obr. 48 Hydraulické lemováčky [27] .....	37